

Rebekka Taubmann

**Untersuchungen zur Erweiterung der
thermogravimetrischen Messung mit
Magnetschwebewaage für die
Differenzthermoanalyse durch Einführung einer
stabilen rotationsfreien magnetischen Lagerung**

**Untersuchungen zur Erweiterung der
thermogravimetrischen Messung mit
Magnetschwebewaage für die
Differenzthermoanalyse durch
Einführung einer stabilen
rotationsfreien magnetischen Lagerung**

Rebekka Taubmann



Universitätsverlag Ilmenau
2013

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Diese Arbeit hat der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Ilmenau als Dissertation vorgelegen.

Tag der Einreichung: 22. Januar 2013

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Eberhard Kallenbach
(Steinbeis Transferzentrum Mechatronik Ilmenau)

2. Gutachter: PD Dr.-Ing Andreas Möckel
(Technische Universität Ilmenau)

3. Gutachter: Prof. Dr. Peter Schwarz
(Hochschule für angewandte Wissenschaften Coburg)

Tag der Verteidigung: 14. Juni 2013

Technische Universität Ilmenau/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Ilmenau

Postfach 10 05 65

98684 Ilmenau

www.tu-ilmenau.de/universitaetsverlag

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

www.mv-verlag.de

ISBN 978-3-86360-070-9 (Druckausgabe)

URN urn:nbn:de:gbv:ilm1-2013000398

Titelfoto: Veit Henkel | Fakultät für Maschinenbau, TU Ilmenau

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit bei der Firma Linseis Messgeräte GmbH in Kooperation mit der Fakultät Maschinenbau der TU Ilmenau. Bedanken möchte ich mich daher bei der Firma Linseis Messgeräte GmbH, die sich bereit erklärt hat meine Promotion in Ihrem Hause zu ermöglichen.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Eberhard Kallenbach. Sein Einverständnis diese Arbeit zu betreuen, sowie sein jederzeit offenes Ohr und die stets aufbauenden Worte haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr. Schwarz (FH Coburg), Herrn Priv.-Doz. Dr.-Ing. habil. Möckel, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Zimmermann, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Fröhlich und Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Linß, sowie allen anderen der TU Ilmenau, die im Rahmen des Promotionsverfahrens mitgewirkt haben.

Mein persönlicher Dank geht auch an Herrn Küster für den gegenseitigen Austausch und die Diskussionsbereitschaft.

Außerdem möchte ich meiner Familie danken, die mich jederzeit unterstützt hat, besonders auch meinem Vater der gleichzeitig auch mein Kommilitone war, und daher auch für einen ständigen Austausch zu haben war. Mein Dank gilt auch meiner Mutter die so manche Korrekturarbeit gemacht hat und immer ein offenes Ohr hatte.

Selb, am 16.07.2013

Zusammenfassung

Vorliegende Dissertation beschreibt die Realisierung eines rotationsfreien stabilen Lagers für den Einsatz in einer Magnetschwebewaage, um neben dem thermogravimetrischen Signal auch eine Differenzthermoanalyse durchführen zu können. Die Differenzthermoanalyse kann durch die schwebende Lagerung der Probe in der Messzelle nicht konventionell über Thermoelemente durchgeführt werden. Daher soll auf eine pyrometrische Temperaturmessung zurückgegriffen werden. Dazu ist geplant – durch ein Sichtfenster in der Messzelle hindurch – die Temperatur der stabil rotationsfrei gelagerten Probe mittels Pyrometer zu bestimmen. Daraus ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Lagerung der Probe, die einerseits eine stabile berührungsfreie Kraftübertragung und andererseits eine rotationsfreie Lagerung ermöglichen muss.

Zur Realisierung dieses Ziels erfolgen zuerst einige theoretische Betrachtungen. Dabei wird geklärt, welche generellen Möglichkeiten es zur Erzeugung eines Schwebezustands gibt. Danach kann abgewogen werden, welche Prinzipien sich zum Einsatz in der Magnetschwebewaage eignen. Daneben finden Untersuchungen zur Optimierung der Robustheit statt.

Nach der Definition der Anforderungskriterien an eine stabile rotationsfreie Lagerung werden verschiedene Möglichkeiten zur Realisierung eines solchen Lagers gegenübergestellt. Daraus lassen sich geeignete Varianten berechnen, aufbauen und prüfen. Im Rahmen der Berechnung werden sowohl analytische als auch FEM-Modelle (Finite Element Methode) genutzt. Die Funktionsprüfung findet, mit geeigneten Methoden, an einem dafür konstruierten Versuchsstand statt. Dabei haben Magnetlager mit einer gezahnten Gehäuseform und einer zusätzlichen permanentmagnetischen Erregung alle Anforderungskriterien erfüllt. Solche Magnetlager können ohne Änderung der Konstruktion in der Magnetschwebewaage genutzt werden, sind einfach herstellbar und kostengünstig. Durch den Einsatz dieses neu entwickelten Magnetlagers, kann neben der thermogravimetrischen Messung auch eine Differenzthermoanalyse durchgeführt werden. Damit ergeben sich für die Magnetschwebewaage weitere Anwendungsbereiche.

Abstract

The present dissertation realizes an irrotational solid bearing for the usage in a magnetic suspension balance in order to perform besides a differential thermal analysis the thermal gravimetric analysis also. The differential thermal analysis can not be executed with conventional thermocouples due to the levitation of the sample in the measuring cell. Therefore a temperature measurement with a pyrometer should be used. For that purpose the temperature of the stable irrotational suspended sample will be measured through an inspection glass in the measuring cell by pyrometry. Out of it specification on the bearing of the sample – which had to offer a stable contactless load transmission and an irrotational bearing also – resulted.

For realization of this goal first some theoretical considerations occur. Therefore general possibilities for generate levitation will be settled. Afterwards the decision for suitable principles for the application in the magnetic suspension balance is possible. Also examinations about optimization of robustness will be done.

After the definition of the requirements to a stable irrotational bearing, different possibilities for development for such a bearing will be opposed. Out of it suitable variations will be calculated, build and tested. In the computation analytical and FEM (Finite Element Method) models will be used. The testing of function takes places on a test station constructed for this application only. In this process magnetic bearing with a slotted body housing and an additional permanent magnetic excitation observe all requirements. These magnetic bearings can be used in the magnetic suspension balance without any changing in construction, are easy producible and cheap.

By the usage of this new developed magnetic bearing, also the differential thermal analysis besides the thermal gravimetric analysis is practicable. This magnetic bearing beats the state of the art of such magnetic bearing in the magnetic suspension balance.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Ziel der Dissertation | 3 |
| 3 | Stand der Technik..... | 5 |
| 4 | Grundlagen der Thermischen Analyse | 11 |
| 4.1. | Thermogravimetrie..... | 11 |
| 4.2. | Differenzthermoanalyse | 14 |
| 4.3. | Simultane Thermische Analyse..... | 16 |
| 5 | Grundlagen der Schwebelagerung..... | 20 |
| 5.1. | Generelle Möglichkeiten zur Erzeugung eines Schwebezustands | 20 |
| 5.2. | Berührungsfreie Kraftübertragung mit Magnetschwebelagern in der Magnetschwebewaage | 22 |
| 6 | Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktions- prüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage | 25 |
| 6.1. | Geplantes Vorgehen..... | 25 |
| 6.2. | Stand der Technik rotationsfreier Lager in der Magnetschwebe-waage | 27 |
| 6.3. | Beschreibung möglicher Ursachen der Rotationsanregung | 29 |
| 6.4. | Kriterien zur Optimierung des Magnetschwebelagers | 32 |
| 6.5. | Versuchsaufbau zur Prüfung der Funktionalität | 34 |
| 6.6. | Messmethoden | 41 |
| 7 | Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotations- symmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage..... | 46 |
| 7.1. | Anforderungsprofil und Lastenheft | 46 |
| 7.2. | Auslegung und Berechnung..... | 49 |
| 7.2.1. | Berechnung des Magnetlagers | 49 |
| 7.2.2. | Auslegung der Erregerwicklung und der Regelung | 54 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 7.3. | Ergebnisse aus der Berechnung des Magnetlagers..... | 54 |
| 7.4. | Prüfung des rotationssymmetrischen Funktionsmusters | 55 |
| 8 | Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnet- lagers für die Magnetschwebewaage | 57 |
| 8.1. | Anforderungsprofil und Lastenheft | 57 |
| 8.2. | Generelle Möglichkeiten zur Realisierung | 60 |
| 8.3. | Ausgewählte Lagervarianten zur näheren Betrachtung..... | 67 |
| 8.4. | Berechnung und Auslegung verschiedener rotationsfreier Magnetlager | 69 |
| 8.4.1. | Prinzip: Formänderung mittels quadratischen Gehäuses ohne zusätzliche Erregung | 69 |
| 8.4.2. | Prinzip: Formänderung mittels Zahnung ohne zusätzliche Erregung | 71 |
| 8.4.3. | Prinzip: Formänderung mittels Zahnung mit zusätzlicher Erregung | 82 |
| 8.4.4. | Prinzip: Rastierung mit und ohne zusätzliche Erregung | 89 |
| 8.4.5. | Prinzip: Drehfeld mit und ohne zusätzliche Erregung..... | 97 |
| 8.4.6. | Gegenüberstellung der berechneten Varianten..... | 100 |
| 8.5. | Prüfung der Funktionsmuster zur rotationsfreien Lagerung..... | 104 |
| 8.5.1. | Prinzip: Formänderung mittels quadratischen Gehäuses ohne zusätzliche Erregung | 106 |
| 8.5.2. | Prinzip: Formänderung mittels Zahnung ohne zusätzliche Erregung | 106 |
| 8.5.3. | Prinzip: Formänderung mittels Zahnung mit zusätzlicher Erregung | 107 |
| 8.5.4. | Prinzip: Drehfeld ohne zusätzliche Erregung | 108 |
| 8.6. | Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen | 109 |
| 8.7. | Zusammenfassung aus Berechnung und Prüfung der rotationsfreien Lagerung | 111 |
| 9 | Einbindung der neuen rotationsfreien Magnetlagerung in die Magnetschwebewaage | 113 |
| 10 | Zusammenfassung | 115 |
| 11 | Literaturverzeichnis..... | 118 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 12 | Anhang | 124 |
| 12.1. | Anbringung von Lagesensor und Drehgeber im Versuchsstand..... | 124 |
| 12.2. | Berechnung des Trägheitsmomentes der schwebenden Baugruppe | 126 |
| 12.3. | Notwendige Materialdaten zur Berechnung der Magnetlager..... | 127 |

Formelzeichen

| Zeichen | Bedeutung | Einheit |
|-------------------|--|----------|
| a | Flächenfaktor | --- |
| A | Querschnitt, Fläche | m^2 |
| A_L | Fläche eines Zahns der Zahngeometrie | m^2 |
| A_Z | Fläche einer Lücke der Zahngeometrie | m^2 |
| B | magnetische Flussdichte | T |
| c | Drehfederkonstante bzw. Steilheit der Drehmoment-Kennlinie | Nm/deg |
| D | Durchmesser des Magnetlagers | m |
| d | Abstand zwischen Rotationsachse und außermittigen Druckbeaufschlagung | m |
| d_Z | Abstand zwischen den Zähnen des Magnetlager | m |
| d_L | Abstand zwischen den Lücken des Magnetlagers | m |
| f | Frequenz | s^{-1} |
| F | Kraft | N |
| F_E | Elektromagnetkraft | N |
| F_{E1} | Elektromagnetkraft (abstoßend) in Position z_1 | N |
| F_{E2} | Elektromagnetkraft (anziehend) in Position z_2 | N |
| F_G | Gewichtskraft | N |
| F_L | Lorentzkraft | N |
| F_P | Permanentmagnetkraft | N |
| F_{P1} | Permanentmagnetkraft in Position z_1 | N |
| F_{P2} | Permanentmagnetkraft in Position z_2 | N |
| $F_{\text{Stoß}}$ | Stoßkraft | N |
| F_x | Querkraft in x-Richtung ohne Rotorversatz | N |
| F_x' | Querkraft in x-Richtung bei Versatz des Rotors um 0,1 mm in x-Richtung | N |
| F_y | Querkraft in y-Richtung ohne Rotorversatz | N |
| F_y' | Querkraft in y-Richtung bei Versatz des Rotors um 0,1 mm in y-Richtung | N |

| | | |
|--------------|--|----------|
| $G_{m,L,L}$ | magnetischer Leitwert des Luftspalts zwischen den Lücken der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten | H^{-1} |
| $G'_{m,L,L}$ | magnetischer Leitwert des Luftspalts zwischen den Lücken der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten bei verdrehten Schwebemagneten | H^{-1} |
| $G_{m,L,Z}$ | magnetischer Leitwert des Luftspalts zwischen den Zähnen der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten | H^{-1} |
| $G'_{m,L,Z}$ | magnetischer Leitwert des Luftspalts zwischen den Zähnen der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten bei verdrehten Schwebemagneten | H^{-1} |
| h_Z | Zahnhöhe der Zahngeometrie im Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten | m |
| I | elektrischer Strom | A |
| J | Trägheitsmoment | kgm^2 |
| J_{ges} | Gesamtträgheitsmoment | kgm^2 |
| J_1 | Trägheitsmoment des Permanentmagneten | kgm^2 |
| J_2 | Trägheitsmoment der Gehäuse des Magnetlagers | kgm^2 |
| J_3 | Trägheitsmoment des Ferritkerns im LVDT | kgm^2 |
| J_4 | Trägheitsmoment des Probengestänges | kgm^2 |
| J_5 | Trägheitsmoment der Messlast | kgm^2 |
| k | Schwingungszahl | --- |
| M | Drehmoment | Nm |
| M_{ges} | Gesamtmoment | Nm |
| M_n | Moment auf eine Zahn-Lücke-Paarung | Nm |
| M_{Rast} | Rastmoment | Nm |
| m | Masse | kg |
| m_0 | Ausgangsmasse | kg |
| m_{PM} | Masse des Permanentmagneten | kg |
| m_G | Masse der Gehäuse des Magnetlagers | kg |
| m_K | Masse des Ferritkerns im LVDT | kg |
| m_{St} | Masse des Probengestänges | kg |
| m_L | Masse der Messlast | kg |
| q | elektrische Ladung | As |

| | | |
|----------------|--|----------|
| $R_{m,G (HM)}$ | magnetischer Widerstand des Gehäuses des Haltemagneten | Ω |
| $R_{m,G (SM)}$ | magnetischer Widerstand des Gehäuses des Schwebemagneten | Ω |
| $R_{m,K}$ | magnetischer Widerstand des Eisenkerns | Ω |
| $R_{m,L}$ | magnetischer Widerstand des Luftspaltes zwischen Eisenkern und Permanentmagnet | Ω |
| $R_{m,L,L}$ | magnetischer Widerstand des Luftspalts zwischen den Lücken der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten | Ω |
| $R'_{m,L,L}$ | magnetischer Widerstand des Luftspalts zwischen den Lücken der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten bei verdrehten Schwebemagneten | Ω |
| $R_{m,L,Z}$ | magnetischer Widerstand des Luftspalts zwischen den Zähnen der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten | Ω |
| $R'_{m,L,Z}$ | magnetischer Widerstand des Luftspalts zwischen den Zähnen der Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten bei verdrehten Schwebemagneten | Ω |
| $R_{m,PM}$ | magnetischer Widerstand des Permanentmagneten | Ω |
| $R_{m,S}$ | magnetischer Widerstand der Spule | Ω |
| $R_{m,Z(HM)}$ | magnetischer Widerstand eines Zahns Z im Gehäuse des Haltemagneten | Ω |
| $R_{m,Z(SM)}$ | magnetischer Widerstand eines Zahns Z im Gehäuse des Schwebemagneten | Ω |
| r_{PM} | Radius des Permanentmagneten | m |
| $r_{G,i}$ | Innenradius der Gehäuse des Magnetlagers | m |
| $r_{G,a}$ | Außenradius der Gehäuse des Magnetlagers | m |
| r_K | Radius des Ferritkerns | m |
| $r_{St,i}$ | Innenradius des Probengestänges | m |
| $r_{St,a}$ | Außenradius des Probengestänges | m |
| r_L | Radius der Messlast | m |
| T | Temperatur | K |
| T_P | Probentemperatur | K |
| T_R | Referenztemperatur | K |

| | | |
|----------------------|--|-------------------|
| T_0 | Anfangstemperatur | K |
| ΔT | Temperaturdifferenz | K |
| t | Schwingungsdauer | s |
| \dot{V} | Einströmvolumen | m ³ /h |
| w | Strömungsgeschwindigkeit | m/s |
| x | Weg in x-Richtung | m |
| Z_{Z-L} | Anzahl der Zahn-Lücke Paarungen am Schwebemagneten | --- |
| z | Hub (= Abstand zwischen Halte- und Schwebemagnet) | m |
| z_0 | Hub in gewünschter Schwebebeziehung | m |
| z_1 | Hub ₁ | mm |
| z_2 | Hub ₂ | m |
| Φ | magnetischer Fluss | Wb |
| Φ_{ges} | magnetischer Gesamtfluss | Wb |
| Φ_L | magnetischer Fluss über eine Lücke L | Wb |
| Φ_Z | magnetischer Fluss über einen Zahn Z | Wb |
| α | Auslenkungswinkel | deg |
| β | Heizrate | K/min |
| β_L | Verdrehwinkel des Schwebemagneten, gültig für Lücken | deg |
| β_Z | Verdrehwinkel des Schwebemagneten, gültig für Zähne | deg |
| θ | magnetische Durchflutung | A |
| θ_{PM} | magnetische Durchflutung des Permanentmagneten | A |
| θ_S | magnetische Durchflutung der Spule | A |
| μ_r | relative Permeabilität | Vs/Am |
| μ_0 | Permeabilität des Vakuums | Vs/Am |
| ρ | Dichte | g/m ³ |
| ω | Winkelgeschwindigkeit | rad/s |

Abkürzungen

| Bezeichnung | Bedeutung |
|-------------|--|
| DTA | Differenzthermoanalyse |
| ED | Einschaltdauer |
| ETA | Emanationthermoanalyse |
| FEM | Finite Element Methode |
| G | Gehäuse des Magnetlagers |
| HM | Haltemagnet |
| K | Eisenkern |
| L | Luftspalt bzw. Lücke der Zahngeometrie im Gehäuse des Magnetlagers |
| LVDT | Differentialtransformator (Linear Variable Differential Transformer) |
| P | Probe |
| PM | Permanentmagnet |
| Py | Pyrometer |
| R | Referenz |
| SM | Schwebemagnet |
| STA | Simultane Thermische Analyse |
| TG | Thermogravimetrie |
| Z | Zahn der Zahngeometrie der Gehäuse des Magnetlagers |

Erklärung zur Bezeichnung der entwickelten rotationsfreien Varianten

In der folgenden Arbeit ergeben sich die verschiedenen Magnetlagervarianten. Zur Übersicht werden diese mit folgendem Schema beschriftet:

Prinzip – Erregung – Variante – Untervariante

| | |
|---------------|---|
| Prinzip | 1 Formänderung 2 Rastierung 3 Drehfeld 4 Aktives Lager mit Rastierung / Drehfeld |
| Erregung | 1 ohne zusätzliche Erregung 2 mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung |
| Variante | a, b, c, (fortlaufend zur Nummerierung der Varianten) |
| Untervariante | 1, 2, 3, (fortlaufend zur Nummerierung von Untervarianten) |

1 Einleitung

Die Kenntnis von thermodynamischen Eigenschaften ist in vielen Prozessen der Forschung und Technik Voraussetzung, sowohl um Materialien weiter zu entwickeln, zu analysieren und zu prüfen als auch um technische Anlagen auszulegen und Qualitätsüberwachung zu betreiben. Dabei nimmt die Thermische Analyse eine Schlüsselrolle ein. Zu den Thermischen Analysemethoden zählt unter anderem die gravimetrische Messung. Damit sind Änderungen der vertikalen Kräfte auf eine Probe bei veränderter Umgebungsbedingung messbar. Daher kann Aufschluss über viele physikalische und chemische Phänomene – wie zum Beispiel Phasenumwandlungen, magnetische Eigenschaften, Adsorptionseigenschaften, Dichte von Flüssigkeiten – erhalten werden.

Herkömmliche Instrumente der thermischen gravimetrischen Analyse bestehen aus einer registrierenden, im Allgemeinen elektronisch arbeitenden Mikrowaage. Außerdem sind Vorrichtungen zur Beheizung oder Kühlung der Waagschale bzw. des Tiegels mit der Probe vorgesehen, sowie eine Anordnung zur programmierten Erzeugung von Atmosphären gewünschter Drücke und Gaszusammensetzungen. Für die Ablaufsteuerung und Messdatenerfassung ist ein Computer vorgesehen.

Die Waagschale mit der Probe ist dabei mechanisch über einen Aufhängedraht bzw. -stab an die Waage gekoppelt. Dieser wird über eine enge Durchführung in die Messzelle geleitet. Um die Waage vor aggressiven oder kontaminierenden Atmosphären zu schützen, muss das Waagengehäuse mit einem Intergas (Spülgas) unter Druck gefüllt werden. Diese Vorkehrung bietet jedoch keinen sicheren Schutz der Waage. Außerdem erzeugt dieses Schutzgas in der Wägezelle eine tangential, auf den Aufhängedraht wirkende Kraft, die einen Messfehler des gravimetrischen Signals verursachen kann. Weitere Nachteile bestehen darin, dass Inertgas in die Messzelle strömt und das Messgas verunreinigt. Außerdem muss das Schutzgas während der gesamten Messung strömen. Das macht diese Geräte teuer und unflexibel.

Deshalb werden die Waage und die Messzelle in der so genannten Magnetschwebewaage räumlich getrennt. Der Kraftfluss von der Probe zur Waage wird

1 – Einleitung

dazu berührungsfrei über eine magnetische Kupplung durch die Messzellenwand geführt. Die Probe ist damit nicht mehr direkt an die Waage gekoppelt, sondern hängt an einem Schwebemagneten, der wiederum von einem an der Waage befestigten Elektromagneten in einem freien Schwebezustand gehalten wird. Über eine Sensorspule wird die Lageänderung des Schwebemagneten erfasst und damit der Schwebezustand geregelt. Die Waage ist somit vor hohen Drücken, Temperaturen und reaktiven Gasen geschützt. Die Verwendung eines Inertgases, zum Schutz der Mikrowaage gegen die korrosive Wirkung aggressiver Gase und eventuelle Kondensation der Messgase, entfällt und reduziert damit den Messaufwand.

Neben der thermogravimetrischen Messung lassen sich mit der Magnetschwebewaage die Dichte, Sorption, Viskosität und Oberflächenspannung bestimmen. Damit besitzt die Magnetschwebewaage einen weiten Anwendungsbereich. Dazu gehört der Einsatz in der Grundlagenforschung und der Materialprüfung genauso wie industrielle Applikationen zur Abgasreinigung, Kohlevergasung, Bodenentgiftung, Rückstandsverbrennung und der überkritischen Extraktion. Weitere Einsatzgebiete finden sich in der Kunststofffabrikation, Lebensmittelherstellung, Entwicklung von Membranen der Brennstoffzelle, Wasserstoff- und Erdgasspeicherung und dessen Herstellung.

2 Ziel der Dissertation

Die derzeit bekannten Magnetschwebewaagen zeichnen Massenänderungen über Temperatur und Zeit bei verschiedenen Atmosphären und Drücken auf. Mit dieser Dissertation soll ermöglicht werden, neben der Aufzeichnung des thermogravimetrischen Signals (TG) zeitgleich eine Differenzthermoanalyse (DTA) durchführen zu können.

Dazu ist es notwendig – neben der zu messenden Probe – eine Vergleichsprobe in den Raum einzubringen und die Temperaturdifferenz zwischen beiden zu messen. Nachdem es aufgrund der berührungsfreien Lagerung in der Magnetschwebewaage nicht möglich ist, mit Thermoelementen zu arbeiten, soll auf eine Temperaturmessung mittels Pyrometrie zurückgegriffen werden, was eine stabile Lagerung der Probe und Referenz erfordert.

Bislang ist es nicht möglich die Probe während der Messung in der Magnetschwebewaage stabil zu lagern. Die Probe beginnt, bedingt durch die reibungsfreie Lagerung und unter anderem durch die Gasströmungen in der Messzelle, zu rotieren. Mit einer rotationsfreien magnetischen Lagerung soll die Probe stabil im Messraum gehalten werden. Dadurch wird es möglich, eine zweite Probe in den Probenraum einzuführen und die Temperaturdifferenz pyrometrisch aufzuzeichnen. Somit besteht der wesentliche Teil der Arbeit darin, eine stabile rotationsfreie Lagerung zu realisieren. Dabei gilt es zu beachten, dass durch die Lagerung selbst kein Krafteintrag in die vertikale Richtung erfolgen darf, um das thermogravimetrische Messsignal nicht zu verfälschen.

Mit der stabilen rotationsfreien magnetischen Lagerung wird es somit möglich eine Simultane Thermische Analyse (Simultane Messung von Thermogravimetrie (TG) und Differenzthermoanalyse (DTA)) bei hohen Temperaturen und hohem Druck sowie aggressiven Medien in einer Magnetschwebewaage durchzuführen. Es werden Temperaturen bis ca. 1800 °C und Drücke bis zu 50 bar angestrebt.

2 – Ziel der Dissertation

Zur Realisierung dieses Ziels werden in der vorliegenden Arbeit folgende Schritte dargestellt:

Zuerst erfolgt eine Einführung in die Grundlagen der Thermischen Analyse. Diese kann dabei nicht vollständig beschrieben werden, da es in vorliegender Arbeit nicht um eine Entwicklung einer neuen Messmethode der Thermischen Analyse geht. Vielmehr erfolgt eine Weiterentwicklung eines bestehenden Gerätes. Weiterführende Literatur zur Thermischen Analyse ist in [1] zu finden.

Danach findet eine Aufstellung der generellen Möglichkeiten zur Erzeugung eines Schwebezustands statt. Zusammen mit einer Anforderungsliste an die berührungsfreie Kraftübertragung, erfolgt die Berechnung und Auslegung eines solchen Lagers.

Im nächsten Teil erfolgt die Entwicklung eines rotationsfreien Lagers. Dazu sind ebenfalls die Aufstellung eines Lastenhefts und die Untersuchung der generellen Möglichkeiten zur Realisierung notwendig. Danach werden für verschiedene geeignete Varianten die Berechnung und Auslegung sowie die Funktionsprüfung des Rotationsverhaltens an aufgebauten Lagervarianten durchgeführt.

Für eine optimale Auslegung sind auch die Ursachen der Rotationsanregung und mögliche Kriterien zur Optimierung der Robustheit zu klären. Außerdem werden ein geeigneter Versuchsstand zur Prüfung der verschiedenen Funktionsmuster aufgebaut und geeignete Messmethoden vorgestellt.

Mit diesem Vorgehen ist es möglich das entwickelte rotationsfreie Lager mit dem Stand der Technik zu vergleichen. Weiterhin wird die Anbindung dieser Lagervariante in der Magnetschwebewaage beschrieben. Damit ist die Voraussetzung geschaffen, eine pyrometrische Temperaturmessung in eine Magnetschwebewaage einzubinden und damit ein Differenzthermosignal zu generieren.

Durch die Realisierung der zusätzlichen Messmethode der Differenzthermoanalyse in einer Magnetschwebewaage ergeben sich weitere Möglichkeiten zur Materialcharakterisierung. Dazu gehört die Identifizierung und Gehaltsanalyse einzelner Probenbestandteile. Weiterhin können Umwandlungs- und Zersetzungstemperatur mit zugehöriger Enthalpie genauso bestimmt werden wie die Temperatur- und Oxidationsstabilität. Mit diesen Werten sind Aussagen über einzelne Reaktionsschritte mit deren Kinetik und Polymorphie realisierbar. Damit ist auch die Erstellung von Phasendiagrammen möglich.

3 Stand der Technik

Seit Earnshaw [2] existiert die Idee der Magnetlagerung und wird seit 1842 ständig weiterentwickelt. Die aktive magnetische Lagerung wird seit 1933 vielseitig eingesetzt und die berührungsfreie Kraftübertragung wurde bereits von Clark [3] genutzt.

Entwicklungen moderner Magnetschwebewaagen erfolgen seit über 25 Jahren. Von Gast [4] - [8] und Wagner [9] - [11] wurden universell einsetzbare Schwebesysteme entwickelt, darunter auch die von Firma Sartorius kommerziell vertriebene Schwebewaage, die mittlerweile technisch überholt und daher nicht mehr erhältlich ist. Seit 1990 wird die Magnetschwebewaage von der Firma Rubotherm entwickelt und vertrieben. Mit der heutigen Magnetschwebewaage ist es möglich Massenänderungen bis auf 1 µg genau zu messen.

Die magnetische Kopplung in der Magnetschwebewaage dient zur berührungslosen Übertragung der Gewichtskraft von einer Waagschale mit Probe zu einer registrierenden Waage. Die Last wird dabei über ein sich anziehendes Magnetpaar durch die Wandung der Messzelle hindurch an die Waage angekoppelt. Die Probe ist somit nicht mehr mechanisch mit der Waage verbunden, sondern hängt an einem Schwebemagneten, der von einem an der Waage befestigten Elektromagneten in diesem freien Schwebezustand gehalten wird. Das Probengewicht wird somit berührungsfrei aus der Messzelle auf die Mikrowaage übertragen. Damit ist es möglich die Mikrowaage unter Umgebungsbedingungen aufzustellen und sie damit vor hohen Temperaturen, hohen Drücken oder reaktiven Gasen zu schützen. Somit sind thermogravimetrische Messungen in Temperatur- und Druckbereichen möglich, die in einem konventionellen Gerät nicht machbar wären. Außerdem ist eine Rückwirkung der Waage (Spülgas, Konvektion, etc.) auf die Güte eines für die Messung erforderlichen Vakuums oder auf die Reinheit der erforderlichen Atmosphäre ausgeschlossen.

Rubotherm verwendet das Funktionsprinzip der von Lösch et al. [12], [13] entwickelten Standard-Magnetschwebewaage. Der Aufbau einer solchen Magnetschwebewaage gliedert sich in 4 Bereiche: Waage zur Registrierung der Messwerte, Schwebekupplung

3 – Stand der Technik

mit Druckbehälter, Wegaufnehmer und Regelgerät (siehe Bild 3.1). Im Folgenden sollen das Schwebelager, der Wegaufnehmer und das Regelgerät näher erläutert werden.

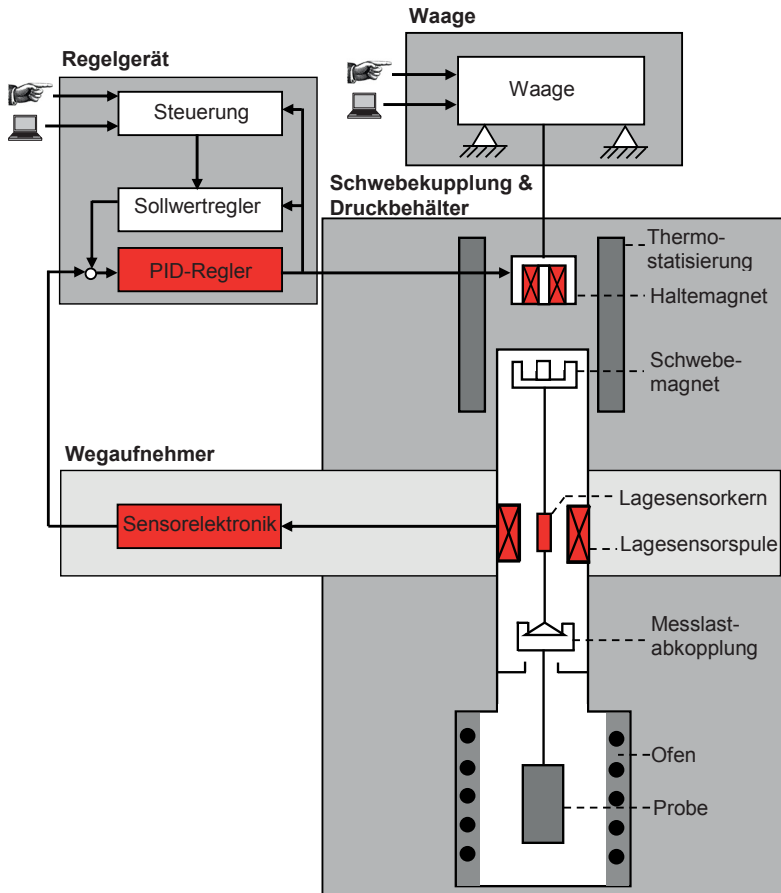


Bild 3.1 Funktionsprinzip der Magnetschwebewaage von Rubotherm [14]

3 – Stand der Technik

Schwebelager

Das Schwebelager besteht aus einem Halte- und einem Schwebemagneten. Der Elektromagnet ist an einer Präzisionswaage aufgehängt und ist als Haltemagnet ausgeführt. Darunter befindet sich der Schwebemagnet in der Messzelle. Der Aufbau entspricht somit einer unterschaligen Anordnung (s. Kapitel 5.3). Im Kopf des Schwebemagneten befindet sich ein Permanentmagnet mit dem die Hauptkraft zur Erzeugung des Schwebezustands erzeugt wird.

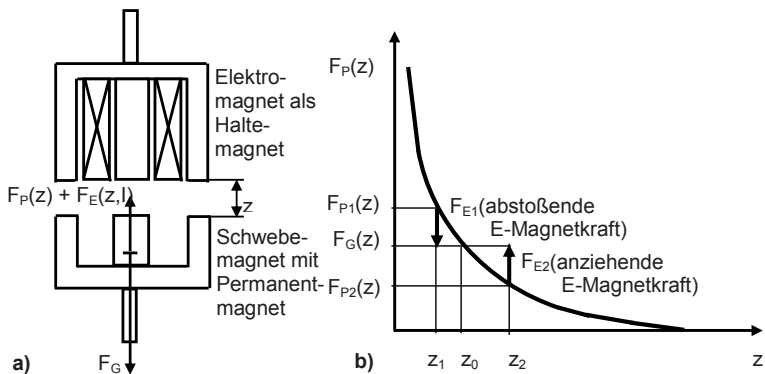


Bild 3.2 a) Schnittbild eines Magnetlagers. b) Magnetkraft-Hub-Kennlinie [14]

Das Prinzip einer solchen Kraftübertragung ist in Bild 3.2 zu sehen. Die Permanentmagnetkraft F_P steigt mit kleiner werdendem Abstand zwischen Halte- und Schwebemagnet. Im Punkt z_0 entspricht die Anziehungskraft, des Permanentmagneten auf den Elektromagneten, der Gewichtskraft F_G auf den Permanentmagneten. Verringert sich nun der Abstand ($z < z_0$) wird der Schwebemagnet nach oben in Richtung Elektromagnet beschleunigt, da die Anziehungskraft größer ist als die Gewichtskraft F_G . Bei steigenden Abstand (d.h. $z > z_0$), wird der Permanentmagnet durch die überwiegende Gewichtskraft nach unten beschleunigt. Die Kraft des Elektromagneten $F_E(z, I)$ ist indirekt proportional vom Luftspalt zwischen Halte- und Schwebemagnet ($F_E \sim 1/z$) und direkt proportional zum Quadrat des Spulenstroms ($F_E \sim I^2$). Damit ein stabiler Schwebezustand eingestellt werden kann, ist die Position des Schwebemagneten zu messen und als Eingangssignal dem Regler zuzuführen.

3 – Stand der Technik

Dort wird die gemessene Position des Schwebemagneten mit einer vorgegebenen Sollposition verglichen und daraus die entsprechend notwendige Bestromung des Elektromagneten bereitgestellt. Damit wird die Kraft des Elektromagneten F_E der Permanentmagnetkraft F_P überlagert. Da für die Stabilisierung der Schwebelagerung ein Wegaufnehmer und ein Regelgerät notwendig sind, werden diese nun kurz erläutert.

Wegaufnehmer und Regelgerät

Mit dem Wegaufnehmer wird die Lage des Schwebemagneten in der Messzelle bestimmt. Der Wegaufnehmer ist zweigeteilt. Ein Teil befindet sich außerhalb der Messzelle und enthält Spule und Sensorelektronik. Der zweite Teil ist am Schwebemagneten befestigt und besteht aus einem Ferritkern. Verändert sich nun der Abstand zwischen Halte- und Schwebemagnet, ändert sich dementsprechend die Eintauchtiefe des Sensorkerns in die Spule. Der Wegaufnehmer erzeugt ein temperaturabhängiges, lageproportionales Gleichspannungssignal, welches über den gesamten vertikalen Wegbereich des Schwebemagneten innerhalb der Messzelle nahezu linear verläuft.

Der PID-Regler dient zur kontinuierlichen Regelung der Schwebelage. Die Ist-Größe wird durch das lineare Wegaufnehmer-Signal geliefert und die Elektromagnetkraft $F_E(z,l)$ dient als Stellgröße. Außerdem ist ein analoger, überlagerter Sollwertregler vorhanden, der den Sollwert liefert. Damit kann eine gewünschte stationäre Elektromagnetspannung vorgegeben werden. Somit ist es möglich mit der Magnetschwebewaage eine automatische Messlastentkopplung durchzuführen. In einer ca. 5 mm niedrigeren Nullpunktlage (Taralage), d.h. die Messlast ist abgekoppelt, wird die Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift der Waage aufgezeichnet und gegebenenfalls korrigiert. Dadurch kann eine hohe Präzision auch bei Langzeitmessungen eingehalten werden [14].

Die beschriebene Regelung wurde von Lösch et al. [12] - [13] entwickelt. Mit dieser Regelung kann die Gewichtskraft des Messgutes aus der Messzelle auf die außerhalb aufgestellte Waage fehlerfrei übertragen werden. Die Regelung ist nahezu statisch, so dass die dynamischen Regelkräfte kleiner sind als die Waagenauflösung. Das

3 – Stand der Technik

Messergebnis wird nicht verfälscht.

In den heute kommerziell eingesetzten Regelungen für die Magnetschwebewaage wird, im Vergleich zu oben vorgestellter Regelung, ein von Will [15] entwickelter Hybrid-Regler eingesetzt. Dieser Hybrid-Regler besteht ebenso aus dem analogen PID-Regler für die Regelung der Bestromung des Elektromagneten. Allerdings wird der analog, überlagerte Sollwertregler zum An- und Abfahren der verschiedenen Schwebelagen durch einen digitalen, überlagerten Sollwertregler – durch einen im Regelgerät integrierten Mikrocontroller – ersetzt. Die Folge davon ist die Erhöhung der Betriebssicherheit der Magnetschwebekupplung.

Tabelle 3.1 zeigt die derzeit erhältlichen verschiedenen Varianten der Magnetschwebewaage, die entweder als Glas- oder als Metallversion ausgeführt sind. Dabei wird die Quarzglasversion vorwiegend für hochkorrosive Anwendungen genutzt, wohingegen die Metallversion für Hochdruckanwendungen benötigt wird.

Tabelle 3.1 Varianten der Magnetschwebewaage der Firma Rubotherm [26]

| Version | Metall | Quarzglas |
|--|---------------------------------------|--------------------|
| Druck | UHV bis 500 bar | Vakuum bis 1,3 bar |
| Temperatur (für Gesamtmessvolumen, d.h. Schwebelagerung und Messzelle mit Probe) | -196 °C bis 350 °C | -60 °C bis 250 °C |
| Probentemperatur (thermisch entkoppelt) | bis zu 2000 °C (Keramik Messzelle) | bis zu 900 °C |
| Auflösung | 0,01 mg bis 1 µg | |
| Reproduzierbarkeit (Standardabweichung) | ± 0.02 mg bis ± 2 µg | |
| relativer Fehler | <= 0,002 % des Messfehlers | |
| maximale Auslastung | 80 g oder 10 g | |

Die magnetische Lagerung kann maximal einer Temperatur von 750 K ausgesetzt werden. Bei höheren Temperaturen wird im Bereich der magnetischen Lagerung thermostatisiert (d.h. die Temperatur wird konstant bei 150 °C gehalten), um die zulässige Curie-Temperatur des Permanentmagneten nicht zu überschreiten (Bild 3.1). Daher wird in Tabelle 3.1 in Temperatur für das Gesamtmessvolumen und in Probentemperatur unterschieden. Für Sonderanwendungen werden auch Geräte

3 – Stand der Technik

bereitgestellt, die höhere Probengewichte messen können und einen Druck von bis zu 2000 bar zulassen. Bislang sind mit den Magnetschwebewaagen Bestimmungen von Dichte, Sorption, Viskose, Massenänderungen und Oberflächenspannungen möglich [12], [13], [16] - [25].

Die in dieser Dissertation entwickelte Magnetschwebewaage soll vorerst nur zur Durchführung der Thermogravimetrie und der Differenzthermoanalyse zur Verfügung stehen. Deshalb wird auf die Funktionsweise der Magnetschwebewaagen zur Dichte-, Sorptions- und Viskosemessung sowie der Messung der Oberflächenspannung an dieser Stelle nicht eingegangen.

4 Grundlagen der Thermischen Analyse

Das Ziel der Dissertation ist die in der Magnetschwebewaage eingesetzte magnetische Lagerung so weiterzuentwickeln, dass neben der thermogravimetrischen Messung (TG) auch eine Differentialthermoanalyse (DTA) möglich ist. Beide Messverfahren sind Bestandteil der Thermischen Analysemethoden. Deshalb soll im Folgenden der Begriff der Thermischen Analyse erklärt werden. Im Anschluss daran werden die grundlegenden Funktionen und Anforderungen der beiden genannten Methoden (TG und DTA) erklärt.

Die Thermische Analyse umfasst verschiedene Messverfahren, z.B. Thermogravimetrie, Dilatometrie, Thermomechanische Analyse und viele mehr. Die ICTA (International Confederation for Thermal Analysis) beschreibt den Begriff der Thermischen Analyse sehr allgemein: „Thermische Analyse bezeichnet eine Gruppe von Verfahren, bei denen eine physikalische Eigenschaft einer Substanz (und/oder ihrer Reaktionsprodukte) als Funktion der Temperatur gemessen wird, während die Substanz einem geregelten Temperatur-Programm unterworfen wird“ [27].

Die Realisierung des oben genannten „geregelten Temperatur-Programms“ bedeutet, dass nicht die Proben­temperatur im Messgerät, sondern die Temperatur der Heizung geregelt wird und die Proben­temperatur folgt passiv [1].

4.1. Thermogravimetrie

Zuerst soll die Zielsetzung und die Messmethode der Thermogravimetrie beschrieben werden. Diese Messmethode wird angewendet, um die Gewichtsänderung einer Probe während eines definierten Temperatur-Zeit-Profiles und einer vorgegebenen Atmosphäre zu bestimmen [1].

Der Aufbau einer Anlage zur thermogravimetrischen Messung ist schematisch in Bild 4.1.1 dargestellt. Dabei befindet sich die Probe auf einem Messsystem, welches mit einer automatisch kompensierenden Waage verbunden ist. Dieser Aufbau ermöglicht eine kontinuierliche Messung der Gewichtsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur. Eine Änderung der Probenmasse tritt ein, wenn bei Probenreaktionen

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

flüchtige Komponenten entstehen, die der Probe zu- oder abströmen (z.B. Oxidation, Zersetzung). Ergänzt mit dem notwendigen Zubehör – Regler für das Temperaturprogramm und Datenaufzeichnung – wird dieser Aufbau Thermowaage genannt.

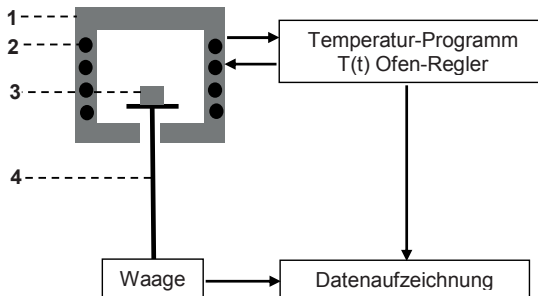


Bild 4.1.1 Schematischer Aufbau einer Anlage zur thermogravimetrischen Messung; 1 Messzelle; 2 Heizelemente; 3 Probe; 4 Messsystem mit Thermoelementen [1]

Die Proben­temperatur (bzw. die Ofen­temperatur) wird meist mit einer konstanten Heizrate $\beta = dT/dt$ erhöht. Teilweise werden auch isotherme Versuchsdurchführungen oder stufenweise Temperaturerhöhungen benötigt. Die Proben­masse eines geschlossenen Systems ist unabhängig von der Temperatur oder der Zeit. Daher sind thermogravimetrische Untersuchungen nur möglich, wenn die Probe mit der Umgebung Materie austauschen kann. Dabei kann die Probe flüchtige Komponenten an die Umgebung abgeben oder Reaktionspartner aufnehmen. Es wird demnach die Proben­masse m über der Temperatur T gemessen und daraus die Massenänderung Δm durch subtrahieren der Anfangsmasse m_0 der Probe nach Gleichung (4.1.1) bestimmt [1]:

$$m = m(T) \text{ bzw. } \Delta m = m(T) - m_0 \quad (4.1.1)$$

Neben dem Temperatur-Zeit-Programm ist die Probe zusätzlich abhängig von der Atmosphäre im Probenraum. Bei der thermogravimetrischen Untersuchung einer Probe wird normalerweise ein Inertgas verwendet, das die Probe laminar umströmt. Von der Probe abgegebene Reaktionsgase werden durch die Gasströmung sehr schnell

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

entfernt, so dass keine Rückreaktion erfolgt. Soll die Probe gezielt mit einem speziellen Gas reagieren, wird dieses in die Messzelle eingebracht. Die Atmosphäre im Probenraum beeinflusst die Probenreaktion direkt, da diese an der Wärmeübertragung vom Ofen zur Probe beteiligt ist und somit die Probentemperatur mitbestimmt [1].

Die wichtigsten Bestandteile einer Thermowaage sind somit der Ofen mit Temperaturregler, die Waage, die Komponenten zur Gasversorgung und die Messdatenaufzeichnung und -verarbeitung. Dabei gelten folgende Anforderungen an den Ofen mit Temperaturregler: An der Probe muss ein homogenes Temperaturfeld erzeugt werden, um eine Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden, die eine scheinbare Veränderung/Verschiebung von Reaktionen durch inhomogene Probentemperaturen zur Folge haben können. Weiterhin gibt es verschiedene Möglichkeiten die Waage und den Ofen anzuordnen (Bild 4.1.2 und Bild 4.1.3). Dabei gilt zu beachten, dass der Ofen die Funktion der Waage möglichst wenig beeinflusst. Außerdem müssen alle Bauteile, die in die Messzelle hineinragen, so ausgelegt werden, dass die Homogenität des Temperaturfeldes an der Probe nicht gestört wird [1].

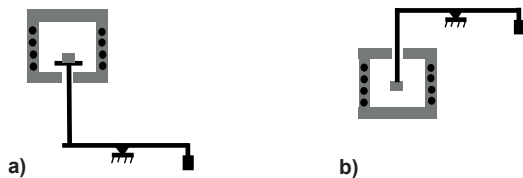


Bild 4.1.2 Verschiedene Möglichkeiten zur Anordnung von Waage und Ofen. a) Vertikaler Ofen mit oberhalbiger Wägung. b) Vertikaler Ofen mit unterhalbiger Wägung [1]

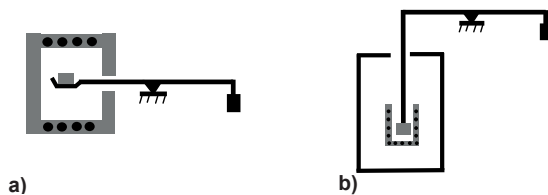


Bild 4.1.3 Weitere Möglichkeiten zur Anordnung von Waage und Ofen. a) Horizontaler Ofen. b) Tiegelförmiger Ofen für bessere Probenumschließung [1]

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

Die Anforderungen an die Waage lauten wie folgt: Je nach Messanforderung muss ein Einbringen von Probenmasse im Gramm- bis Milligramm-Bereich möglich sein. Die messbaren Massenänderungen sollen im Mikrogramm-Bereich liegen. Für den Anwender ist ein hoher Bedienkomfort für das Einlegen der Probe und die Tarierung wünschenswert sowie die Automatisierung des Wägevorgangs. Der Vakuumbetrieb und verschiedene wechselnde Gase dürfen das Wägesignal nicht beeinflussen. Diese Punkte werden nur von Waagen erfüllt, die über eine Gewichtskraftkompensation bzw. die Kompensation der Gewichtskraftänderung – teilweise oder völlig durch elektromagnetische Kräfte – verfügen [1].

4.2. Differenzthermoanalyse

Bei der Differenzthermoanalyse befinden sich die zu messende Probe und eine Vergleichsprobe – die als Referenz dient – im Ofen und werden einem vorgegebenen Temperatur-Zeit-Programm unterworfen. Währenddessen wird die Temperaturdifferenz ΔT zwischen Probe und Referenz als Funktion der Temperatur gemessen (Bild 4.2.1) [1].

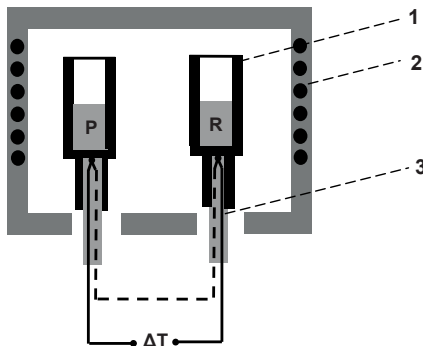


Bild 4.2.1 Schematischer Aufbau einer Differenzthermoanalyse mit auf dem Temperaturfühler aufgesteckten Tiegeln. P Probe; R Referenz bzw. Vergleichsprobe; 1 Tiegel; 2 Messzelle und Heizelemente; 3 Aluminiumoxid-Kapillare mit Temperaturfühler [1]

Bei gleicher Wärmekapazität von Probe und Referenz und gleichen Wärmeübergängen

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

zur Umgebung – das entspricht einer idealen thermischen Symmetrie der Messanordnung – sind die Wärmeströme vom Ofen zur Probe und zur Vergleichsprobe gleich groß. Daher werden Probe und Vergleichsprobe gleich schnell erwärmt, so dass die Temperaturdifferenz $\Delta T = 0$ ist.

Dieser stationäre Zustand kann gestört werden, wenn durch eine Reaktion in der Probe Wärme freigesetzt oder verbraucht wird oder sich deren Wärmekapazität ändert. Somit ist die Temperaturdifferenz ungleich null und bewirkt eine Änderung des Wärmestroms vom Ofen zur Probe. Diese Änderung ist ein Maß für den Reaktionswärmestrom und ist charakteristisch für die jeweilige Probenreaktion. Beim Schmelzen eines reinen Metalls bleibt beispielsweise die Probentemperatur beim Erreichen der Schmelztemperatur solange konstant bis die gesamte Probe geschmolzen ist. Somit können mit diesem Verfahren Substanzen identifiziert werden, sofern entsprechende Vergleichskurven vorliegen [1].

Die Temperaturdifferenz ΔT kann auf unterschiedliche Art gemessen werden. Es gibt Bauarten in denen die Thermoelemente direkt in die Proben- bzw. Vergleichssubstanz eintauchen, oder die Temperaturfühler stehen in thermischem Kontakt mit dem Probenbehälter (siehe auch Bild 4.2.1). Weiterhin ist die Position zur Messung der Bezugstemperatur festzulegen. Theoretisch kommen dafür die Ofen-, Proben-, Referenz- und Tiegeltemperatur in Frage oder die Bezugstemperatur wird an einer probennahen Stelle gemessen. Die „korrekte“ Messstelle wäre die Probentemperatur. Allerdings ist diese bei Reaktion meist inhomogen. In den meisten Fällen wird die Temperatur der Referenz als Bezugstemperatur gewählt (Bild 4.2.2). Diese entspricht im Idealfall der Temperatur der Probe [1].

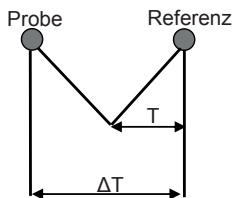


Bild 4.2.2 Schema zur Bildung der Temperaturdifferenz mit Messung der Bezugstemperatur an der Referenz [51]

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

Bei der Differenzthermoanalyse wird somit die Temperaturdifferenz ΔT durch subtrahieren der Referenztemperatur T_R von der Proben­temperatur T_P nach [1] erfasst:

$$\Delta T(T) = T_P(T) - T_R(T) \quad (4.2.1)$$

Bei einer linearen Änderung der Bezugstemperatur mit der Zeit t ist folgende Formel gültig [1]:

$$\Delta T(t) = T_P(t) - T_R(t) \quad (4.2.2)$$

Zusammen mit der Heizrate β und der Anfangstemperatur T_0 gilt für die Temperatur T :

$$T = T_0 + \beta t \quad (4.2.3)$$

Die Bestandteile eines Gerätes zur Differenzthermoanalyse sind der Ofen mit Temperaturregler, das Messsystem, Komponenten zur Erzeugung der gewünschten Atmosphäre und ein Gerät zur Datenaufzeichnung. Die Symmetrie der Wärmeübergänge und die Homogenität der Ofentemperatur müssen deutlich besser ausgeprägt sein als bei den oben beschriebenen Thermowaagen. Ansonsten wirken auf Probe und Referenz unterschiedliche Temperaturen ein, die einen Messfehler zur Folge haben. Mithilfe des Messsystems wird das Messsignal gebildet. Es besteht bei allen Geräten zur Differenzthermoanalyse aus Thermoelementen, einer mechanischen Fixierung bzw. Führung der Thermoelemente und der Aufnahme für Probe und Referenz.

4.3. Simultane Thermische Analyse

Die in Kapitel 4.1 beschriebene Thermogravimetrie ist im Allgemeinen nur bei Beteiligung von flüchtigen Komponenten möglich. Treten während der Messung einer Probe Reaktionen mit und ohne flüchtige Komponenten auf, so können mit der thermogravimetrischen Messung nur Aussagen über die Reaktionen mit flüchtigen Komponenten gemacht werden. Die Wiedergabe der Reaktionen ist somit lückenhaft. Dies bedeutet eine Einschränkung gegenüber der Differenzthermoanalyse, da mit diesen auch reine Festkörperreaktionen analysierbar sind, die keine Gewichtsänderung bewirken. Es werden somit Reaktionen untersucht, bei denen Reaktionswärme oder eine Änderung der spezifischen Wärmekapazität auftritt.

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

Um Aussagen über die Reaktionen mit und ohne flüchtige Komponenten machen zu können, findet daher ein simultanes Einsetzen der Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse statt [1]. Die Übersichten in Tabelle 4.3.1 und Tabelle 4.3.2 zeigen die analysierbaren Reaktionstypen bzw. Messgrößen jeweils mit der Thermogravimetrie und der Differenzthermoanalyse.

Tabelle 4.3.1 Mittels Thermogravimetrie analysierbare Reaktionstypen [1]

| Reaktionen mit gasförmiger Komponente | |
|--|---|
| Probe | → Gas (Verdampfung, Sublimation, Dissoziation) |
| Probe | → festes Reaktionsprodukt + Gas (z.B. Desorption, Zersetzung) |
| Probe + Gas | → festes Reaktionsprodukt (z.B. Oxidation) |
| Probe + Gas | → festes Reaktionsprodukt + gasförmiges Reaktionsprodukt (z.B. Reduktion) |
| Reaktionen ohne gasförmiger Komponente | |
| Ferromagnetische Probe | → Paramagnetische Probe |

Tabelle 4.3.2 Messbare Größen und bestimmbare Daten mittels Differenzthermoanalyse

| Messbare Größen mit der Differenzthermoanalyse bzw. Differenz-Kalorimetrie | |
|--|---|
| | • spezifische Wärmekapazität |
| | • charakteristische Temperaturen einer Reaktion oder Umwandlung |
| | • Art der Reaktion (exotherm, endotherm) |
| | • Reaktionswärme |
| Bestimmbare Daten aus der Messkurve | |
| | • Glasumwandlung |
| | • Kristallinität |
| | • Aushärteverhalten |
| | • Stabilität |
| | • Reinheitsbestimmung |
| | • Phasendiagramme |
| | • Identifizierung der Probensubstanz |

Mit Geräten zur Simultanen Thermischen Analyse (STA) können zwei oder mehrere thermoanalytische Methoden an derselben Probe gleichzeitig durchgeführt werden. Weiterhin sind bei der Simultanen Analyse die äußeren Parameter (Heizrate,

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

Gasdurchfluss, usw.) identisch und die Zuordnung zwischen dem Messsignal und der Temperatur ist damit sicherer und erleichtert dann die Interpretation der Messkurven. Ein weiterer Vorteil ist die Zeitersparnis [1]. Die Nachteile des Empfindlichkeitsverlustes der Einzeltechniken, die größere Störanfälligkeit sowie ein erhöhter Präparations- und Bedienungsaufwand und höhere Investitionskosten sind ebenfalls zu erwähnen und für jeden Fall abzuwägen [1].

Es sind mit den simultanen Methoden neben der Kombination von Thermogravimetrie (TG) und Differenzthermoanalyse (DTA) auch andere Methoden verkoppelbar. Es können den verschiedenen Geräten der Thermischen Analyse Massenspektrometer zur Gasanalyse, Wasserdampfdetektoren, gasitrimetrische Einheiten oder Geräte zur Emanationthermoanalyse (ETA) bzw. Emissionsgasthermoanalyse (EGA) und andere Messmethoden nachgeschaltet werden [1].

Für die vorliegende Dissertation ist die Kopplung von Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse relevant. Mit der Standard Magnetschwebewaage findet eine thermogravimetrische Analyse statt. Im Rahmen dieser Arbeit soll zusätzlich eine Differenzthermoanalyse durchgeführt werden. Damit lässt sich eine Simultane Thermische Analyse realisieren.

Ein konventionelles Gerät zur Simultanen Thermischen Analyse von Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse beinhaltet eine Waage, einen Ofen und ein Messsystem – welches einerseits Probe und Referenz mechanisch mit der Waage verbindet und andererseits Thermoelemente trägt, welche die Proben- und Referenztemperatur messen können. Weiterhin sind Komponenten zur Gasversorgung und die Datenaufzeichnung und -verarbeitung notwendig.

In Bild 4.3.1 ist ein konventionelles Gerät zur Simultanen Thermischen Analyse zu sehen. Der Wägebalken befindet sich im unteren Gehäuseteil. Die Waage lässt sich vor aggressiven Gasen aus der Messzelle schützen, indem das Waagengehäuse mit entsprechenden Spülgasen durchströmt wird. Auf dem Waagebalken ist rechts das Messsystem angekoppelt, welches die Aufzeichnung der Messergebnisse der Thermogravimetrie und der Differenzthermoanalyse ermöglicht. Direkt daneben befindet sich die Peripherie zur Einleitung von Messgasen bzw. die Erzeugung von Vakuum. Der Ofen umschließt das Messsystem mit Probe und Referenz. Die

4 – Grundlagen der Thermischen Analyse

Bedienerkonsole ist einfach gestaltet. Es kann von dort aus der Ofen über einen mechanischen Hubmechanismus senkrecht nach oben gefahren werden. Dadurch ist das Einlegen und Wechseln von Probenmaterial sehr bedienerfreundlich und kann in kürzester Zeit durchgeführt werden. Das Display am Gehäuse gibt Auskunft über die aktuellen Messwerte, wie Proben temperatur, dem Messignal der Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse. Außerdem ist der Anzeige zu entnehmen, ob die Datenaufzeichnung und die Temperaturregelung laufen.

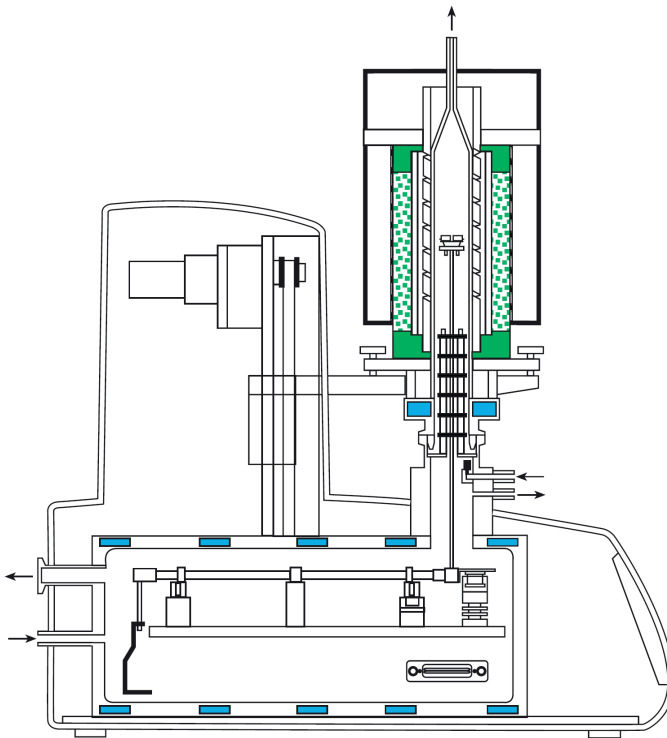


Bild 4.3.1 Gerät zur Simultanen Thermischen Analyse [50]

5 Grundlagen der Schwebelagerung

In der Magnetschwebewaage findet die Kraftübertragung zwischen Probe und Waage berührungslos statt. Dazu ist ein stabiler Schwebezustand der Probe bzw. einer Halteeinrichtung für die Probe erforderlich. Dieser Schwebezustand kann mit verschiedenen technischen Lösungen generiert werden. Um eine geeignete Variante für die Erarbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung zu finden, beinhaltet dieses Kapitel die Grundlagen zur Erzeugung eines Schwebezustandes und die Eigenschaften verschiedener Magnetlager. Darüber hinaus beschreibt Kapitel 5.2, welche Anforderungen das Magnetlager in der Magnetschwebewaage erfüllen muss und welche Arten von Lagern sich dafür eignen.

5.1. Generelle Möglichkeiten zur Erzeugung eines Schwebezustands

Schweben ist das Verharren eines Körpers auf konstanter Höhe in einer Flüssigkeit oder einem Gas. Theoretisch gibt es verschiedene Möglichkeiten einen Schwebezustand zu realisieren [28] - [31]. Schwebezustände gibt es auch in der Hydrodynamik (Ball im Wasserstrahl, Flugzeug) und der Plasmaphysik (Kugelblitze, im Laserstrahl schwebende Flüssigkeitströpfchen oder Gasbläschen). Diese Schwebevorgänge erfolgen nicht berührungsfrei und sind daher für die Magnetschwebewaage nicht relevant.

Berührungsloses Schweben ist mit elektrostatischen bzw. magnetostatischen Feldern möglich. Die Untersuchungen von Earnshaw [2] und Braunbeck [34], [35] zeigen, dass ein statisches, stabiles, freies Schweben eines Systems I im elektrischen, magnetischen und Schwerfeld eines anderen Systems II unmöglich ist, solange nicht in mindestens einem der beiden Systeme diamagnetische Materie vorhanden ist. Die relative Permeabilität von diamagnetischen Stoffen weicht nur sehr gering von 1 ab. Deshalb werden starke Magnetfelder benötigt um diamagnetische Körper von nur wenigen Milligramm schweben zu lassen. Aus Gewichtsgründen lässt sich diese Variante innerhalb der Magnetschwebewaage nicht realisieren.

5 – Grundlagen der Schwebelagerung

Weiterhin ist das freie berührungsfreie Schweben eines elektrisch gut leitenden Körpers in einem unregelmäßigen, niederfrequenten Wechselfeld möglich. Die notwendige Kraft zur Kompensation der Schwerkraft und der anderen vertikal wirkenden Kräfte auf den Probenkörper werden durch Wirbelströme erzeugt.

Mit der Regelung von mindestens einer Bewegungsrichtung (vertikale oder horizontale Lage) kann der Schwebezustand mit elektrischen und magnetischen Feldern realisiert werden. Die Kräfte, die sich von elektrischen Feldern übertragen lassen, sind um vieles geringer als die von magnetischen Feldern. Daher ist die Nutzung von magnetischen Feldern und einer Regelung für die Generierung des Schwebezustandes in einer Magnetschwebewaage geeignet.

Zusammenfassend kann man die verschiedenen Magnetlager in passive und aktive einteilen. Bei den passiven wird die Lagerfunktion in einem oder mehreren Freiheitsgraden ohne Stromspeisung durchgeführt. Die Kraftwirkung kann anziehend oder abstoßen erfolgen und das Lager ist je nach dem aus permanentmagnetischen, ferromagnetischen oder supraleitenden Komponenten aufgebaut. Damit kann grundsätzlich keine vollständige Lagerung in allen Freiheitsgraden erfolgen. Deshalb ist eine Kombination mit aktiven, d.h. elektrisch geregelten Lagersystemen notwendig.

Die genaue Einteilung und Unterteilung der aktiven und passiven Systeme zeigt folgende Übersicht [32]:

Passive Magnetlager

Permanentmagnetlager mit

- rein permanentmagnetischen Komponenten
- permanentmagnetischen und ferromagnetischen Komponenten
- permanentmagnetischen und supraleitenden Komponenten

Elektrodynamisches Wirbelstromlager (Voraussetzung: schnelle Bewegung) mit

- metallischen Leitern
- Supraleitern

Aktive (geregelte) Magnetlagersysteme

Elektromagnetlager mit

- elektromagnetischer und
- permanentmagnetischer Luftspaltvormagnetisierung (Unipolarlager (unipolarer permanentmagnetischer Luftspaltfluss) und Heteropolarlager (Luftspaltfluss mit Vorzeichenwechsel))

Lagerlose Motoren (Motoren mit integrierter Magnetlagerwicklung)

- Synchronmotoren (Permanentmagnet-, Reluktanzmotoren) und
- Asynchronmotoren

5.2. Berührungsfreie Kraftübertragung mit Magnetschwebelagern in der Magnetschwebewaage

Für den Einsatz eines Magnetlagers in der Magnetschwebewaage ist es wichtig, Gewichtsänderungen der Probe, in Form einer Kraft, berührungsfrei auf die Waage zu übertragen. Voraussetzung dazu ist ein freier Schwebezustand des Probenkörpers innerhalb des Messraums. In der Vergangenheit wurde dies mit verschiedenen Aufbauten realisiert. Die Magnetschwebewaagen unterscheiden sich nach [12] in drei verschiedenen Merkmalen:

- Art der Erzeugung des statischen Feldes zur Übertragung der Hauptkraft,
- Art der Regelung des Schwebelagers und
- Art der Kraftmessung.

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Erzeugung eines Schwebezustands werden in Kapitel 5.1 detailliert erläutert. Bezogen auf den Einsatzbereich von Magnetlagern in einer Magnetschwebewaage lassen sich folgende Punkte darstellen:

Für die Ausführung des Lagers zur Übertragung der Hauptkraft gibt es verschiedene Möglichkeiten. Sowohl für die Realisierung des magnetischen Aufbaus als auch bei den einsetzbaren Materialien sind kaum Grenzen gesetzt. Die Übertragung der Hauptkraft kann durch ein Magnetfeld, das durch Spulen oder durch Permanentmagnete erzeugt wird, übertragen werden. Eine Erzeugung des statischen Feldes mittels Spulen hat den Vorteil der Abschaltbarkeit der Kraft. Dann würde die Waage allein das Gewicht des Haltemagneten messen und die Nullpunktkorrektur der

5 – Grundlagen der Schwebelagerung

Waage ist durchführbar. Damit wäre eine Thermostatisierung (siehe Kapitel 3) des Wägebereichs nicht mehr notwendig. Allerdings gilt das nur, wenn tatsächlich kein Restmagnetismus nach dem Abschalten mehr vorhanden ist. Das ist nur mit einem Luftspulen-Haltemagneten möglich. Sobald eine Eisenkernspule verwendet wird, führt der Restmagnetismus innerhalb des Eisens zu nicht reproduzierbaren Kräften – auch im abgeschalteten Zustand [12].

Nachteilig – bei einer Luftspulenanordnung – sind die erforderlichen höheren Ströme und die größeren Spulenwicklungen zur Erzeugung gleicher Kräfte. Das dabei resultierende hohe Gewicht, die großen Abmessungen und die hohe Wärmeentwicklung des Magnetlagers sind unvorteilhaft.

Deshalb bietet es sich an, die Hauptkraft mit polarisierten Elektromagneten zu erzeugen. Damit können relativ große Kräfte generiert werden und der Haltemagnet arbeitet im stationären Bereich nahezu leistungslos. Daher ist die heute gängige eingebaute Variante ein polarisierter Elektromagnet, d.h. der Haltemagnet besteht aus einem Gehäuse mit Spule und Eisenkern und der Schwebemagnet aus Rückschlussgehäuse und Permanentmagnet.

Die Art der Regelung hängt vom Aufbau des Lagers im Messaufbau ab. Es wird dabei zwischen ober- und unterschaligen Anordnungen unterschieden (Bild 4.1.2). Bei den unterschaligen Anordnungen befindet sich der schwebende Körper unterhalb der Waagenanordnung. Bei der oberchaligen Variante ist es umgekehrt.

Normalerweise sind vertikal geregelte Magnetschwebewaagen unterschalig und horizontal geregelte oberchalig angeordnet. Dieser Zusammenhang gilt nur, solange die zu übertragende Kraft in Richtung der Schwerkraft wirkt. Wirkt diese in entgegengesetzte Richtung (z.B. Auftrieb des Schwebekörpers ist größer als sein Gewicht), so kehrt sich der Zusammenhang um [12].

Die aktuell genutzten Magnetschwebewaagen verwenden meist einen unterschaligen Aufbau. Bei einer unterschaligen Variante wird vertikal geregelt, d.h. die Position des schwebenden Teils wird in vertikaler Richtung gemessen und als Stellgröße verwendet. Bei diesem Aufbau herrschen nur Zugkräfte, somit zentriert sich die Lagerung selbst und es sind sehr viel größere Kräfte übertragbar als mit der oberchaligen Variante.

Die oberchalige Variante benötigt zumeist eine horizontale Regelung, d.h. die horizontale Position wird als Stellgröße genutzt. Dadurch entstehen mehrere Nachteile:

5 – Grundlagen der Schwebelagerung

Das Schwebelager besitzt ein wesentlich höheres Eigengewicht sowie größere Abmessungen und erfordert eine bessere Regeldynamik. Der größte Vorteil bei der oberhalbigen Anordnung ist, dass die Messtemperatur deutlich größer als die Temperatur des Schwebelagerbereichs sein kann, ohne dass Störungen durch Konvektion entstehen [36].

Für die Kraftmessung gibt es zwei verschiedene Realisierungsmöglichkeiten. Meistens wird die Kraft vom Haltemagneten mechanisch auf eine Präzisionswaage übertragen. Allerdings ist bei den vertikal geregelten Lagern auch eine direkte Kraftmessung mit dem Schwebelager selbst möglich, da automatisch Signale anfallen, aus denen die Kraft bestimmt werden kann. Dazu müssen hohe Anforderungen an die Regelung und Wegmessung bzgl. Langzeitdrift- und Reproduzierbarkeit erfüllt werden. Unter anderem darf das Schwebelager keine Hysterese besitzen [12].

Wenn die Variante mit einer mechanischen Übertragung auf eine Präzisionswaage gewählt wird, teilen sich die Anforderungen auf. Das Magnetschwebelager und die Mess- und Regelelektronik müssen jedoch hohe dynamische Anforderungen erfüllen. Es gilt den Schwebezustand so gut zu regeln, dass die Kraftmessung mit der Waage nicht gestört ist. Die Waage hat die Anforderungen an die Stabilität und Genauigkeit zu erfüllen. Somit fallen die hohen dynamischen Ansprüche an die Waage weg. Zudem kann die Waage frei gestaltet werden und muss sich konstruktiv nicht den Erfordernissen der Messzelle anpassen.

Daher ist auch eine Balkenwaage verwendbar, die den größten Teil der zu übertragenden Kraft (Totlast) durch ein Gegengewicht kompensieren kann. Dann muss nur noch die eigentliche Messkraft bzw. Kraftänderung elektromagnetisch kompensiert werden [12].

Im Rahmen dieser Arbeit wird wegen der oben genannten Vor- und Nachteile die Magnetschwebewaage unterschallig aufgebaut. Daraus ergibt sich eine vertikale Regelung, die mit einem PID-Regler realisiert wird. Die Kraftmessung findet mit einer am Haltemagneten mechanisch gekoppelten Präzisionswaage statt. Als Abstandssensor wird ein Differentialtransformator (LVDT) gewählt und die Hauptkraft wird durch einen polarisierten Elektromagneten erzeugt, der in den folgenden Kapiteln näher untersucht wird.

6 Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

6.1. Geplantes Vorgehen

Vorhergehende Kapitel zeigen, dass für den Einsatz in der Magnetschwebewaage ein aktiv geregeltes Magnetlager geeignet ist. In den gängigen Geräten wird dies in einem überschaubaren Aufbau angeboten. Dieses Lager ist rotationssymmetrisch aufgebaut. Durch die reibungsfreie Ausführung, kann es sich durch verschiedene Umgebungseinflüsse (z.B. Gasströmungen in der Messzelle) zu drehen beginnen. Das Ziel dieser Dissertation ist ein rotationsfreies Lager zu entwickeln, um ein weiteres Messsignal – das Differenzthermosignal – bestimmen zu können. Dazu ist das Einbringen von Probe und Referenz im Messraum notwendig. Im konventionellen Aufbau werden Thermoelemente zur Temperaturmessung genutzt (Kapitel 4). Die zugehörige elektrische Leitungsführung wird über die mechanische Kopplung zwischen Probe und Waage innerhalb des Messsystems zur Elektronik geführt. Dieser Aufbau ist bei der Magnetschwebewaage durch die berührungsfreie Kraftübertragung nicht möglich. Vorgesehen ist daher das Differenzthermosignal pyrometrisch zu bestimmen. Dazu wird in der Messzellenwand ein Sichtfenster angebracht sein, durch das jeweils mit Sicht auf die beiden Proben mittels Pyrometrie die Temperatur gemessen werden kann.

Bild 6.1.1 zeigt den Vergleich des konventionellen Aufbaus eines Geräts zur Simultanen Thermischen Analyse, der Standard Magnetschwebewaage und der im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiterentwickelten Magnetschwebewaage. Mit dem konventionellen Aufbau eines Geräts zur Simultanen Thermischen Analyse kann die Thermogravimetrie und die Differenzthermoanalyse simultan durchgeführt werden. Bei der Standard-Magnetschwebewaage kann durch die berührungsfreie Kraftübertragung nur die Thermogravimetrie stattfinden. Außerdem ist eine Rotation der schwebenden Baugruppe inklusive Probe nicht zu vermeiden. Daher soll im Rahmen dieser Arbeit ein rotationsfreies stabiles Magnetlager für die Magnetschwebewaage realisiert werden. Damit kann die Thermogravimetrie und die Differenzthermoanalyse simultan mit der Magnetschwebewaage durchgeführt werden.

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Die Entwicklung eines solchen Lagers soll in mehreren Schritten durchgeführt werden. Im ersten Schritt dreht sich um die Auslegung des Magnetlagers zur berührungsfreien Kraftübertragung (Stand der Technik), ohne eine Rotationsfixierung zu berücksichtigen. Dazu ist ein Lastenheft mit dem notwendigen Anforderungsprofil zu erstellen. Danach erfolgt eine theoretische Betrachtung verschiedener Lagerungsmöglichkeiten für diese Anforderungen, indem deren verschiedene Vor- und Nachteile gegenübergestellt werden. Nachdem die theoretisch optimale Variante festgelegt ist, wird hinterfragt mit welchen Parametern die Robustheit in den verschiedenen Achsen beeinflussbar ist. Gleichzeitig ist zu prüfen inwieweit das Lager hinsichtlich Optimierung dieser Robustheitskriterien für die spätere Rotationsfixierung vorbereitet bzw. angepasst werden kann. Danach ist das Magnetlager für den Einsatz zur berührungsfreien Kraftübertragung in der Magnetschwebewaage geeignet.

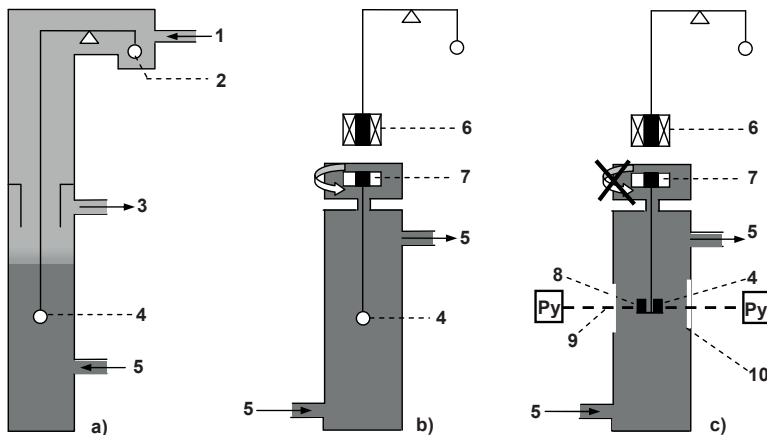


Bild 6.1.1 Gegenüberstellung des konventionellen Aufbaus eines Geräts zur Simultanen Thermischen Analyse (a), der Standard Magnetschwebewaage (b) und der im Rahmen der vorliegenden Arbeit weiterentwickelten Magnetschwebewaage (c). 1 Inertgas; 2 Waage; 3 Inertgase und korrosive Gase; 4 Probe; 5 Korrosive Gase; 6 Haltemagnet; 7 Schwebemagnet; 8 Referenz; 9 Wärmestrahlung gemessen mit Pyrometer (Py); 10 Sichtfenster [26]

Im nächsten Schritt wird ein rotationsfreies Lager entwickelt, um die Temperaturmessung an Probe und Referenz mittels Pyrometrie zu realisieren. Hierfür

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebwaage

ist ein Lastenheft notwendig. Anschließend werden die verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung eines rotationsfreien Lagers erfasst. Nach Abwägung der einzelnen Vor- und Nachteile aller Möglichkeiten erfolgt anschließend die Berechnung, Auslegung und der Aufbau von verschiedenen potentiellen Lagervarianten. Der Test am Versuchsstand soll zeigen, inwieweit die erforderliche Funktionsfähigkeit vorhanden ist. Das als optimal erwiesene Magnetlager wird dann näher beschrieben und der Einbau in die Magnetschwebwaage erläutert.

Da es bereits Lager gibt, die in ihrem Freiheitsgrad der Rotation eingeschränkt sind bzw. zum gezielten Drehen der Messlast genutzt werden, erfolgt im Folgenden die Beschreibung dieser Lager und deren Anwendung sowie die Abgrenzung zum Ziel dieser Arbeit. Im Anschluss folgt die Klärung möglicher Ursachen zur Rotationsfixierung, um einerseits die Anforderungen des rotationsfreien Lagers im Lastenheft definieren und andererseits um geeignete Prüfungseinrichtungen am Versuchsstand vorsehen zu können.

6.2. Stand der Technik rotationsfreier Lager in der Magnetschwebwaage

In der Literatur [14] wird ein Lager für die Magnetschwebwaage mit eingeschränkten Rotationsverhalten beschrieben. In [14] wird eine spezielle Magnetschwebwaage zur Dichtemessung realisiert, die zwei Proben übereinander hängend am Probengestänge vorsieht.

Für die Dichtemessung ist es erforderlich zwei Messkörper, die untereinander am Probengestänge befestigt sind, nacheinander in die zu messende Flüssigkeit abzusenken. Daher wurde in [14] ein Mechanismus entwickelt, um beide Messkörper abwechselnd an- und abkoppeln zu können. Dazu werden spezielle Haken am Probengestänge angebracht. Mit einem zusätzlichen Stellmotor – angeordnet zwischen Waage und Haltemagnet – kann der Schwebemagnet gezielt in eine Richtung gedreht werden. Durch eine rechteckige Form des Magnetlagergehäuses dreht sich bei Drehung des Schwebemagneten der Haltemagnet darunter in der gleichen Richtung mit und die Messkörper können über die Haken aufgenommen oder abgesetzt werden. Bild 6.2.1 zeigt den Aufbau der schwebenden Baugruppe, die eingebauten Haken

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

(Abhebegabel) und den Stellmotor zur Bewegung des Haltemagneten.

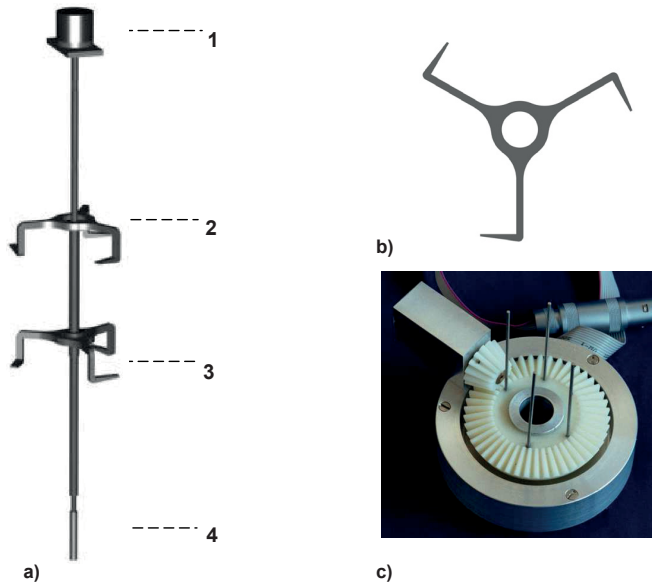


Bild 6.2.1 a) Aufbau der schwebenden Baugruppe in der Magnetschwebewaage zur Dichtemessung. 1 Permanentmagnet mit quaderförmiger Rückschlussplatte; 2 obere Abhebegabel (angeschweißt); 3 untere Abhebegabel (Schraubverbindung); 4 Lagesensorkern; b) Abhebegabel; c) Stellmotor zur Bewegung des Haltemagneten [14]

Tabelle 6.2.1 Gegenüberstellung der Anforderungen an das rotationsfreie Lager aus dem Stand der Technik und des Promotionsziels

| | Stand der Technik | Ziel der Arbeit |
|--|--|--|
| Einsatzzweck | gezieltes Drehen zum An- und Abkoppeln einer Probe | stabiles rotationsfreies Halten zur Durchführung der Differenzthermoanalyse mittels Pyrometrie |
| Anforderungen an zulässigen Rotationswinkel | gering, Verdrehungen $\gg 1^\circ$ unproblematisch | hoch, zulässiger Verdrehwinkel $< 1^\circ$ |
| Positionierbarkeit | nur mit der Verstelleinrichtung | durch das Lager selbst oder mit Verstelleinrichtung |

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Mit dieser Lagervariante ist ein gezieltes Drehen des Halte- und Schwebemagneten möglich und die Rotationsneigung sowie der Rotationswinkel bei angeregter Drehung reduzieren sich. Deshalb wird in Tabelle 6.2.1 diese Magnetlagervariante mit dem im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelten Magnetlagers verglichen.

Das in [14] entwickelte Magnetlager zur Dichtemessung schränkt das Rotationsverhalten ein, vermeidet dieses jedoch nicht. Eine Verdrehung des Schwebemagneten gegen den Haltemagneten um $> 1^\circ$ ist bei diesem Lager zulässig. Dagegen sind die Ansprüche an die weiterzuentwickelnde Lagervariante – im Zug der vorliegenden Arbeit – höher. Da sehr kleine Probengrößen zu vermessen sind, darf der zulässige Verdrehwinkel ein Grad nicht überschreiten, ansonsten ist eine pyrometrische Temperaturmessung nicht mehr möglich.

Weiter lässt sich – mit der für die Dichtemessung verwendeten Standardvariante – die Positionierung nur durch die Verstelleinrichtung mit dem Stellmotor durchführen. Mit der weiterentwickelten Variante – im Rahmen dieser Arbeit – kann die Verdrehung entweder durch das Lager selbst oder durch einen Stellmotor vorgenommen werden. Daraus resultiert die Anforderung, ein ausreichend hohes Rastmoment bei genügend vielen Rastpositionen einzustellen. Beide Anforderungen verhalten sich konträr, daher muss ein Kompromiss zwischen ausreichend Rastmoment und der Anzahl der Rastpositionen gefunden werden. Die quantitative Betrachtung der Anforderungen an das Lager erfolgt in Kapitel 8.1.

6.3. Beschreibung möglicher Ursachen der Rotationsanregung

Die Klärung der möglichen Ursachen für den Rotationsbeginn ist notwendig, um abschätzen zu können, welche Rastmomente des rotationsfreien Magnetlagers erforderlich sind, um eine Rotation sicher vermeiden zu können. Daher werden möglich Ursachen aufgeführt, bewertet und daraus eine Abschätzung der Momente vorgenommen. Mögliche Ursachen zur Anregung einer Rotation sind:

- Auftriebskräfte durch Gasströmungen in der Messzelle,
- Anregungen durch Umgebungseinflüsse (Bewegungen im Labor, etc.) und
- Einströmen des Messgases außermittig zur Rotationsachse.

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Durch unterschiedliche Temperaturen bzw. Gaskonzentrationen innerhalb der Messzelle kann es zu Auftriebskräften durch Gasströmungen kommen. Da diese Kräfte parallel zur Rotationsachse verlaufen, sind dadurch wirkende Momente auf den Schwebemechanismus nicht vorhanden. Eine Ausnahme davon würde theoretisch die Bildung von Verwirbelungen bilden. Diese konnten in der Praxis nicht nachgewiesen werden.

Eine Rotationsanregung durch Umgebungseinflüsse ist ebenfalls möglich. Darunter fallen unter anderem Erschütterungen beim Betreten des Laborraums bis hin zum direkten Berühren der Anlage. Diese Kräfte sind zwar sehr gering, lassen sich allerdings bei der Verwendung von hochsensiblen Waagen am thermogravimetrischen Signal ablesen.

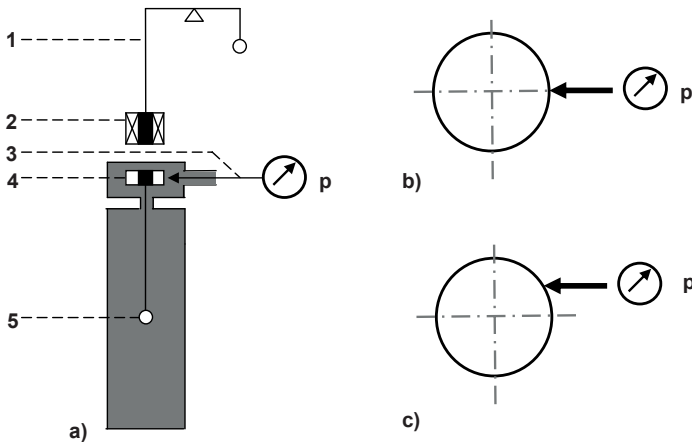


Bild 6.3.1 a) Schematischer Aufbau zur worst-case Abschätzung. 1 Waage; 2 Haltemagnet; 3 Druckzuleitung zum Anströmen des Schwebemagneten; 4 Schwebemagnet; 5 Probe. b) Draufsicht des Schwebemagneten mit mittigen Anströmen des Schwebemagneten und c) mit außermittigen Anströmen des Schwebemagneten [26]

Die dritte potentielle Möglichkeit, um eine Rotation anzuregen, ist das Einströmen eines Gases in die Messzelle außermittig zur Rotationsachse. Dieser Fall kann in der Praxis auftreten, wenn durch Fertigungstoleranzen der Gaseinlass nicht mittig zur

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Rotationsachse des Schwebemagneten angebracht ist. Folgende Skizze in Bild 6.3.1 soll dies verdeutlichen. Die Kräfte, die dadurch entstehen, sind deutlich größer als mögliche Anregungen durch Umgebungseinflüsse. Deshalb kann der außermittige Gaseinlass als worst-case Fall bezeichnet und die dabei auftretenden Momente berechnet werden.

Die in diesem Fall auftretenden Kräfte bzw. Momente lassen sich unter Verwendung folgender Annahmen berechnen. Zuerst wird der Schwebemagnet als feststehende Wand betrachtet [37]. Da der Schwebemagnet eine gekrümmte Fläche besitzt, liegen die berechneten Kräfte deutlich über den tatsächlich am Schwebemagneten auftretenden Kräften. Für die resultierende Stoßkraft $F_{\text{Stoß}}$ bei einem Einstromvolumen \dot{V} und einer Strömungsgeschwindigkeit w gilt:

$$F_{\text{Stoß}} = \rho \cdot \dot{V} \cdot w \quad (6.3.1)$$

Für die Strömungsgeschwindigkeit w gilt bei einem Querschnitt A der Gaszuleitung weiterhin:

$$w = \frac{\dot{V}}{A} \quad (6.3.2)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (6.3.2) in (6.3.1) ergibt sich für die Stoßkraft $F_{\text{Stoß}}$:

$$F_{\text{Stoß}} = \rho \cdot \frac{\dot{V}^2}{A} \quad (6.3.3)$$

Zur Berechnung der auftretenden Kraft werden folgende Annahmen getroffen. Es wird Argon mit einer Dichte von 1,66 g/l als Einstromgas verwendet. Der Durchmesser der Gaszuleitung beträgt 4 mm und das Einstromvolumen 3 m³/h. Diese drei Angaben sind gängige Werte für die Geräteauslegung in der Thermischen Analyse. Damit errechnet sich die Stoßkraft auf den Schwebemagneten zu 92 mN.

Mit einer angenommenen außermittigen Anströmung, d.h. der Abstand d zwischen Rotationsachse und Druckbeaufschlagung beträgt z.B. 1 mm, kann mit der Formel

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

(6.3.4) und einer in (6.3.3) berechneten Stoßkraft $F_{\text{Stoß}}$, das auftretende Drehmoment von $92 \mu\text{Nm}$ angegeben werden. Dieser Wert wird somit als notwendiges Rastmoment M_{Rast} für das rotationsfreie Magnetlager festgelegt.

$$M_{\text{Rast}} = F_{\text{Stoß}} \cdot d \quad (6.3.4)$$

6.4. Kriterien zur Optimierung des Magnetschwebelagers

Bevor mit der eigentlichen Entwicklung des rotationsfreien Magnetlagers begonnen werden kann, ist zu klären, welche Kriterien zur Optimierung der Robustheit eines Magnetschwebelagers in der Magnetschwebewaage geeignet sind. Die Robustheit beschreibt die Stabilität des Lagers hinsichtlich Bewegungsanregung. Diese Überlegungen sind genereller Art und gelten sowohl für die optimale Auslegung eines rotationssymmetrischen Lagers, für die berührungsfreie Kraftübertragung, als auch für die Vermeidung der Rotation mit der Entwicklung eines rotationsfreien Lagers.

Deshalb werden die möglichen Bewegungsformen des Schwebelagers im eingebauten Zustand in der Magnetschwebewaage in den verschiedenen Freiheitsgraden untersucht. Jeder im Raum frei bewegliche Körper hat sechs Freiheitsgrade. Durch den vertikal geregelten unterschalen Aufbau sind nicht alle sechs Freiheitsgrade bestimmt. Bild 6.4.1 zeigt welche Bewegungen die Baugruppe ausführen kann. Die Rotation um die x- und y-Achse kann nicht auftreten.

B1 kennzeichnet die translatorische Bewegung in der z-Achse an. Diese Bewegung kann über eine optimal eingestellte Regelung – in diesem Fall optimal eingestellte P-, I- und D-Faktoren – minimiert werden. Weiterhin kann eine lineare Kraft-Hub-Kennlinie zur Verbesserung des Regelverhaltens beisteuern. Bild 6.4.2 zeigt bei jeweils gleicher Durchflutung einen nichtlinearen Kennlinienverlauf (1), der typisch für einen Flachanker-Elektromagneten ist und einen linearen Verlauf (2), der durch Kennlinienbeeinflussung eines Elektromagneten erzeugt werden kann. Ein solcher Verlauf erleichtert die Regelung der Elektromagnetkraft.

In [42] werden die Möglichkeiten der Anpassung der Kennlinie an den konkreten Belastungsfall als Kennlinienbeeinflussung beschrieben. Dies lässt sich mit entsprechender Anpassung des Ankergegenstücks – in diesem Fall – von Gehäuse und Eisenkern durchführen. Der Kennlinienverlauf lässt sich damit in weiten Grenzen

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

einstellen. Eine solche Anpassung der Kraft-Hub-Kennlinie ist nur möglich, wenn sich das Ankergegenstück in die Kontur des Gehäuses des Haltemagneten hineinbewegen kann. Dies ist durch die vorhandene Messzellenwandung in der Magnetschwebewaage nicht machbar. Deshalb ergibt sich der Nachteil, dass das Kraftniveau über einen kleinen Hub sehr schnell absinkt und daher bereits durch die vorhandene Messzellenwandung nicht mehr ausreichend groß ist. Daher lässt sich die Kennlinienbeeinflussung für diesen Anwendungsfall nicht anwenden.

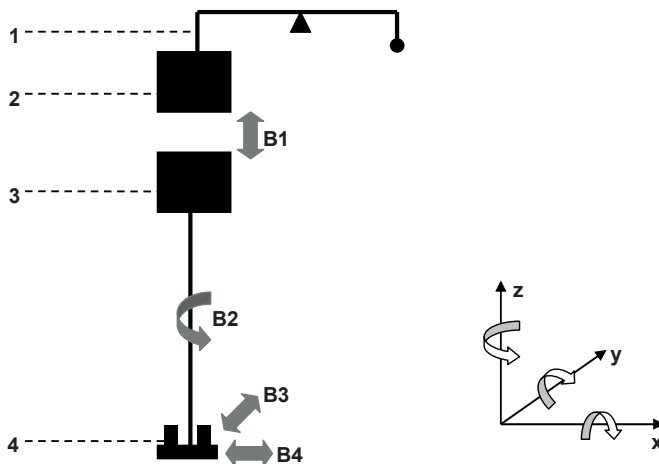


Bild 6.4.1 Darstellung der möglichen translatorischen und rotatorischen Bewegungen der schwebenden Baugruppe inklusive Schwebemagnet und Probenhalter. (1 Waage; 2 Haltemagnet; 3 Schwebemagnet; 4 Probenhalter mit Probe und Referenz; B1 Bewegung 1 translatorisch in der z-Achse; B2 Bewegung 2 rotatorisch um die z-Achse; B3 Bewegung 3 translatorisch in der y-Achse; B4 Bewegung 4 translatorisch in der x-Achse)

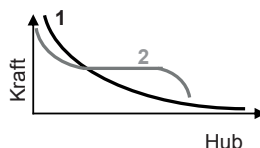


Bild 6.4.2 Schematische Darstellung einer Kennlinienbeeinflussten (2) und einer nicht Kennlinienbeeinflussten (1) Kraft-Hub-Kennlinie eines Elektromagneten bei jeweils gleicher Durchflutung

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Die Rotation um die z-Achse (B2) kann durch verschiedene Maßnahmen beeinflusst bzw. vermieden werden. Die Entwicklung zur Vermeidung der Rotation ist das Kernthema dieser Arbeit und wird in den folgenden Kapiteln detailliert abgehandelt. Allein durch die Rahmenbedingungen – wie z.B. Optimierung des Reglers – ist das rotationssymmetrische Lager nicht rotationsfrei.

Die Bewegungen 3 (B3) in der y-Achse und 4 (B4) in der x-Achsen sind translatorische Bewegungen. Diese Bewegungen entstehen durch äußere Anregung der Schwebelagerung, d.h. zum Beispiel durch einen Luftzug oder durch Bewegen der Messanlage. Da das Lager schwebend durch die Kraftübertragung zwischen Halte- und Schwebemagnet fixiert ist, entsteht eine Pendelbewegung der schwebenden Baugruppe. Abhilfe kann durch Dämpfung des Magnetlagers geschaffen werden. Aus aktueller Sicht ist das nicht notwendig, da diese Bewegung nicht von selbst, sondern nur durch Fremdanregung auftritt, die gezielt vermieden werden kann.

Vorhergehende Erklärungen zeigen, dass die translatorische Bewegung in der z-Achse durch einen optimal eingestellten Regler reduziert werden kann. Für eventuell auftretende translatorische Bewegungen in der x- und y-Achse sind Fremdanregungen die Ursache. Daher sollte – sofern möglich – die Fremdanregung reduziert (z.B. Abschirmung gegen Luftzug, Erschütterungsfreie Lagerung des Gerätes) und falls dies nicht ausreichend umgesetzt werden kann, sind zusätzliche Dämpfungselemente zur Reduzierung dieser Bewegung möglich. Dagegen lässt sich die Rotation in der z-Achse nicht durch die genannten Möglichkeiten zur Optimierung der Robustheit vermeiden bzw. reduzieren. Möglichkeiten zur Realisierung eines rotationsfreien Lagers werden in den folgenden Kapiteln untersucht.

6.5. Versuchsaufbau zur Prüfung der Funktionalität

Zur Prüfung der berechneten Magnetlagervarianten müssen verschiedene Funktionsmuster aufgebaut und geprüft werden. Dazu ist es notwendig einen geeigneten Versuchsstand aufzubauen. Der Versuchsstand ist so auszulegen, dass eine einfache Austauschbarkeit von verschiedenen Lagervarianten möglich ist. Damit sollen lange Rüstzeiten vermieden werden. Bei der Planung des Versuchsstands kann sich an die Anforderungen zum Aufbau des Prüfstands in [12] angelehnt werden.

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Der Versuchsstand gliedert sich in drei Bereiche: Unten befindet sich ein Tisch zur Aufnahme der in der Mitte befindlichen Messanordnung und darauf ist der Wägebereich angebracht. Bild 6.5.1 zeigt den schematischen Aufbau. Gegenüber dem Versuchsaufbau in [12] verfügt dieser Prüfstand über eine runde über drei Punkte aufgespannte Messanordnung (s. Bild 6.5.2), um keine überbestimmten Ebenen zu erhalten.

Der Tisch dient neben der Aufnahme der Messanordnung auch der Schwingungsisolierung und ist daher durch ein hohes Gewicht und einer starren Auslegung gekennzeichnet. Die Bezugsplatte unterhalb des vorgesehenen Wägebereichs ist horizontal und vertikal justierbar. Daran sind drei Gewindestangen befestigt, mit denen die Teile des Schwebelagers, die Trennscheibe, eine Grundplatte sowie Messeinrichtungen wie der Abstandsensoren oder Rotationssensoren angebracht werden können. Alle Teile sind so realisiert, dass sie sich in kürzester Zeit austauschen lassen. Die gesamte Messanordnung lässt sich gegen Luftzug schützen. Dazu ist ein durchsichtiges Kunststoffrohr vorgesehen, welches mit einem Bajonettverschluss auf der Tischplatte fixiert werden kann. Der Wägebereich lässt sich ebenfalls verschließen, um Einwirkungen von Luftbewegungen zu vermeiden. Für die Elektronik ist zwischen Wägebereich und Messanordnung Platz vorgesehen, sowie eine ausreichend große Tischfläche vorhanden.

Im Rahmen dieser Arbeit kann auf ein Wägesystem verzichtet werden (Bild 6.5.1), da die verschiedenen Lagertypen hinsichtlich Funktionalität und Robustheit geprüft werden sollen. Dazu ist ein Wägesignal nicht notwendig. Damit besteht für die ersten Versuche keine Gewichtsbeschränkung durch das Wägesystem.

Die Messlast lässt sich beliebig austauschen. Für den ersten Versuchsaufbau ist ein Carbonstab zur Lastaufhängung einsetzbar, der die Messlast über ein Gewinde ankoppelt. Dadurch können verschiedene Gewichte angebracht und einfach ausgetauscht werden.

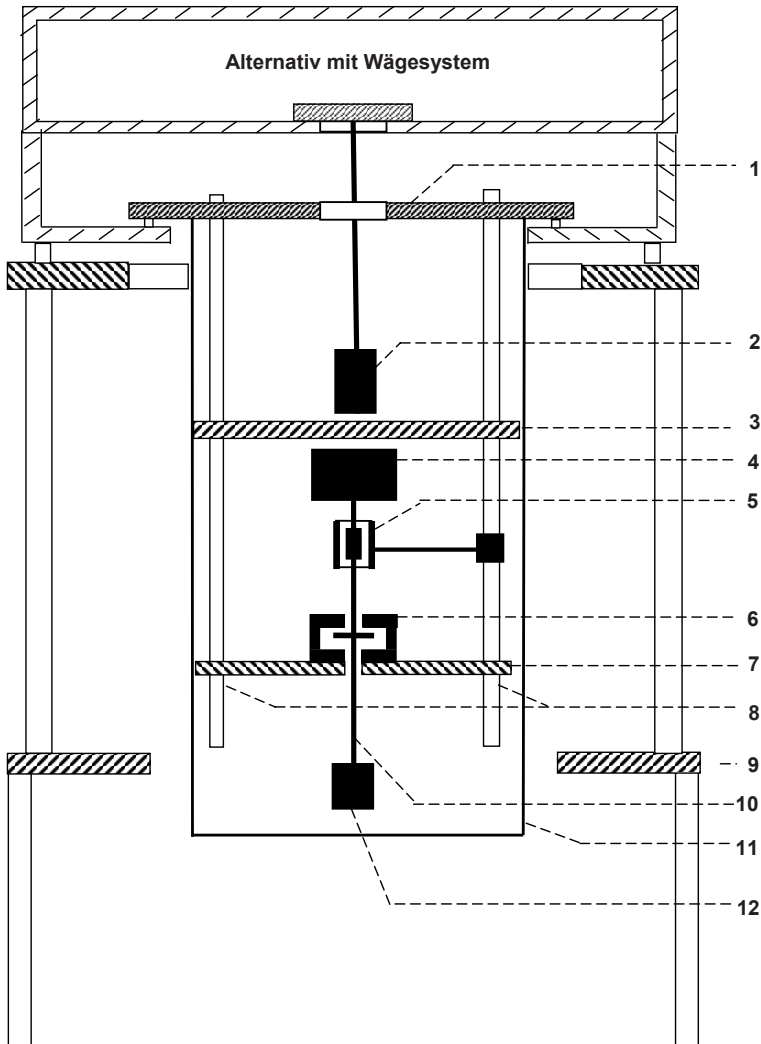


Bild 6.5.1 Skizze des Versuchsstandes zur Prüfung verschiedener Funktionsmuster. 1 Justierbare Bezugsplatte; 2 Haltemagnet; 3 Trennscheibe; 4 Schwebemagnet; 5 Lagesensor (LVDT); 6 Inkrementalgeber oder Drehgeber, alternativ unter der Probe positioniert; 7 Grundplatte; 8 Gewindestangen; 9 Tisch; 10 Lastaufhängung; 11 Abschirmung gegen Luftzug; 12 Messlast

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Die Trennscheibe stellt die Messzellenwand, die später im Gerät zwischen Haltemagnet und Schwebemagnet ist, dar. Die Trennscheibe hat daher zwei Eigenschaften zu erfüllen. Erstens muss die Trennscheibe aus einem magnetisch neutralen Werkstoff bestehen, um Wechselwirkungen auf die Kraftübertragung zu vermeiden. Zweitens muss die Trennscheibe eine ausreichende Festigkeit besitzen, um später auch höheren Drücken im Messraum standhalten zu können. Meist werden daher Kupferlegierungen (z.B. CuCrZr DIN 2.1293, CuBe2 DIN 2.1247 [38]) verwendet, die im ausgehärteten Zustand hochfest sind und eine geringe magnetische Suszeptibilität besitzen. Es sind aber auch spezielle Gläser möglich, die für die Anbringung in der Messzellenwand vorgesehen sind und dementsprechend auch hohen Drücken und Temperaturen standhalten müssen.

Halte- und Schwebemagnet lassen sich über Gewintheadapter jederzeit austauschen und damit sind unterschiedliche Varianten ohne nennenswerte Rüstzeiten prüfbar.

Als Lagesensor wird ein Differentialtransformator LVDT (Linear Variable Differential Transformer) verwendet. Solche Sensoren sind in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen zu finden. Für die speziellen Anforderungen an die Geometrie (Lagebestimmung durch Messzellenwand hindurch) wird ein angepasster Differentialtransformator aufgebaut.

Der Inkremental- bzw. Drehgeber dient dazu Rotationen des Schwebemagneten zu erfassen. Über die aufgezeichneten Drehbewegungen kann dann eine Aussage über das Rotationsverhalten sowie eine Auswertung der vorherrschenden Rastmomente der einzelnen Magnetlagervarianten stattfinden.

Bild 6.5.2 zeigt links in zweidimensionaler Darstellung den gesamten Versuchsstand inklusive Abdeckungen. Darin sind die Bereiche zur Wägung (1), Messung (2) und der Tisch (3) gekennzeichnet. Im rechten Bild ist der Aufbau in dreidimensionaler Darstellung ohne die Abschirmungen gegen Luftzug zu sehen.

Die Einzelfunktionen des Versuchsstands werden nun anhand einzelner Darstellungen näher erklärt. Dazu zeigt Bild 6.5.3 einen Schnitt durch den gesamten Versuchsstand.

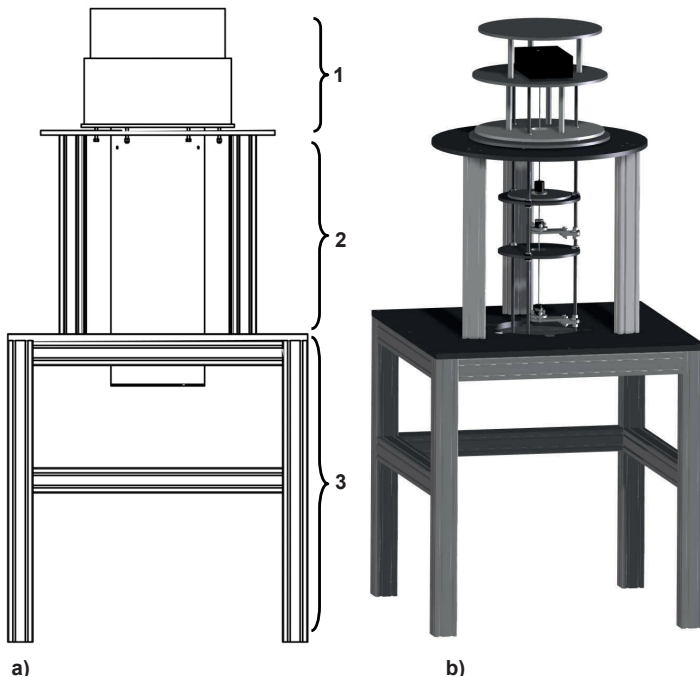


Bild 6.5.2 a) Versuchsstand in zweidimensionaler Darstellung mit Abdeckungen. 1 Wägebereich; 2 Messanordnung; 3 Tisch. b) Dreidimensionale Darstellung des Prüfstands ohne Abdeckungen

Bild 6.5.4 zeigt den Einbau des Magnetlagers in den Versuchsstand. Mit drei Gewindestangen wird eine Zwischenplatte gehalten. Darauf liegen der Direkthalter der Trennscheibe und darüber die Trennscheibe selbst. Diese Halterung erfüllt mehrere Aufgaben. Dadurch, dass die einzelnen Platten nur eingelegt sind, ist es nicht notwendig eine mechanische Fixierung zu lösen, um die Trennscheibe zu entfernen oder gegen eine andere Variante auszutauschen. Weiterhin kann der Direkthalter der Trennscheibe ebenfalls leicht getauscht werden. Dieser Direkthalter imitiert die Messzellenwand.

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von
Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

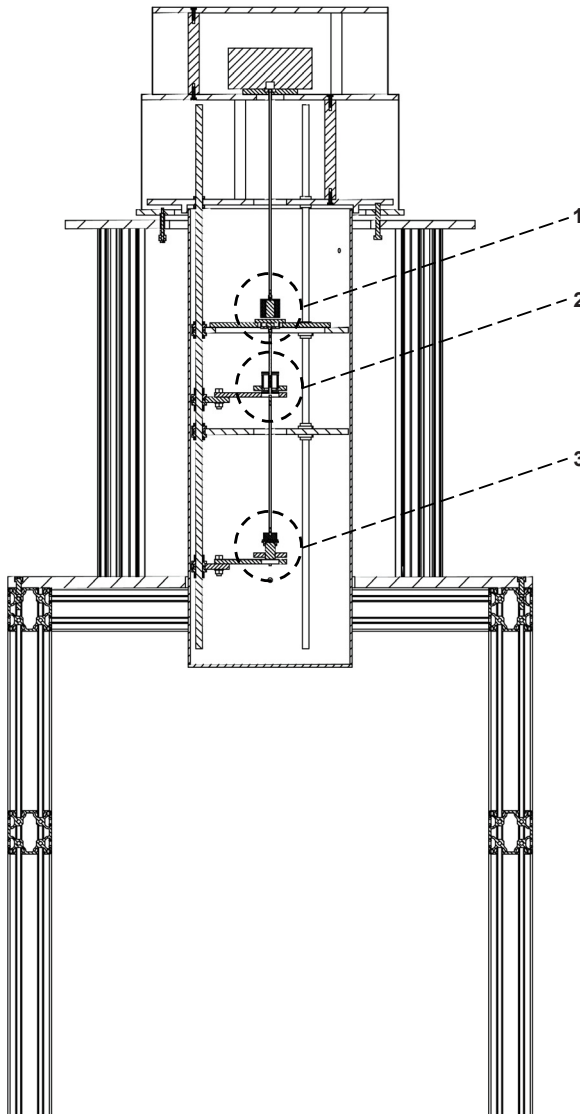


Bild 6.5.3 Schnittbild des gesamten Versuchsstands: 1 Magnetlager; 2 Lagesensor;
3 Drehgeber

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Folgende Skizze in Bild 6.5.5 zeigt stark vereinfacht die Messzelle, durchgehend aus einem Material aufgebaut. Wie oben erklärt, ist es notwendig dieses Bauteil aus einem magnetisch neutralen Werkstoff herzustellen. Geschieht dies nicht, entsteht ein Kraftübertragungsfehler – paramagnetische Materialien verstärken das Magnetfeld und diamagnetische Materialien schwächen es – und das gravimetrische Signal wird somit verfälscht gemessen. Daneben gibt es die Möglichkeit die Messzelle statt aus einem durchgängigen Material aus zwei getrennten Bauteilen zu fertigen (Bild 6.5.5).

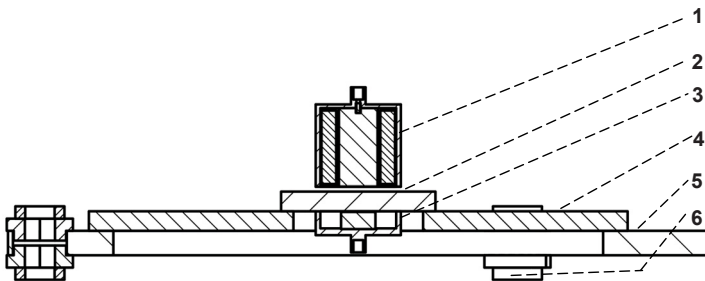


Bild 6.5.4 Schnittbild des eingebauten Magnetlagers im Versuchsstand mit entsprechender Halteinrichtung. Magnetlager bestehend aus Halte- (1) und Schwebemagnet (3); 2 Trennscheibe; 4 Direkthalter der Trennscheibe; 5 Zwischenplatte; 6 Adapter zur Befestigung an den Gewindestangen zur genauen Positionierbarkeit in drei Achsen

Das bietet den Vorteil, dass für die Messzellenwandung ein – für die Festigkeit in dem verlangten Temperatur- und Druckbereich – optimales Material genutzt werden kann, ohne Rücksicht auf magnetische Eigenschaften nehmen zu müssen. Dazu ist eine druckdicht eingebaute Trennscheibe aus Glas einsetzbar. Es muss somit geklärt werden, wie groß der Durchmesser der Trennscheibe sein muss, um ausreichend Abstand zu dem magnetisch nicht neutralen Material der Messzellenwand zu bekommen. Zur Bearbeitung dieser Fragestellung können im Versuchsstand nicht nur die Trennscheiben aus unterschiedlichen Materialien und verschiedenen Abmessungen, sondern auch der Direkthalter der Trennscheibe mit verschiedenen Durchmessern eingesetzt werden.

Die Anbindung des Lagesensors (Bild 12.1.1) und des Drehgebers (Bild 12.1.2) sowie eine Abbildung des kompletten Versuchsstands (Bild 12.1.3) sind im Anhang zu finden.

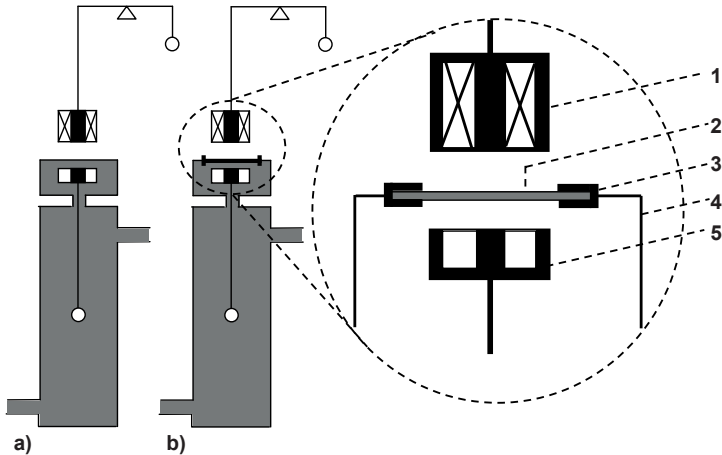


Bild 6.5.5 Schematische Darstellung der beiden Gestaltungsmöglichkeiten der Messzelle. a) Messzelle besteht aus einem durchgängigen Material, b) Messzelle wird aus zwei getrennten Bauteilen hergestellt; 1 Haltemagnet; 2 Trennscheibe; 3 Druckdichte Halterung der Trennscheibe; 4 Messzelle; 5 Schwebemagnet

6.6. Messmethoden

Mit dem erläuterten Versuchsstand sollen verschiedene Größen gemessen werden, um die theoretisch ausgewählten und berechneten Lager auf ihre Funktionsfähigkeit zu prüfen. Zunächst gilt es die berechnete Kraft-Hub-Kennlinie am eingebauten Funktionsmuster nachzuprüfen. Es lässt sich anhand der Übereinstimmung von Berechnungs- und Messergebnissen prüfen, inwieweit das gewählte Berechnungsmodell korrekt ist.

Weiterhin sind das Rastmoment sowie die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie zu bestimmen. Außerdem soll eine worst-case-Prüfung die Prüfung auf Funktionalität abschließen.

Bestimmung der Kraft-Hub-Kennlinie

Zur Aufzeichnung der Kraft-Hub-Kennlinie wird zuerst die Masse m_0 der schwebenden Baugruppe – bestehend aus Schwebemagnet, Gestänge und Messlast – bestimmt. Die Messung der Lageänderung und damit der Einbau des Ferritkerns, sind für diese

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Messung nicht notwendig. Die schwebende Baugruppe wird auf einer Waage platziert und unter dem Haltemagneten positioniert. Bild 6.6.1 zeigt dazu den Aufbau des Versuchsstands. Es lassen sich damit verschiedene Hubwerte z (Abstand zwischen Halte- und Schwebemagnet) und Erregungen I (Bestromung des Haltemagneten) einstellen und die zugehörige Massenänderung $m_1(I, z)$ an der Waage ablesen. Mit diesen Messwerten kann die Kraft-Hub-Kennlinie bestimmt werden, indem von der gemessenen Anfangsmasse m_0 die – bei jeweiliger Bestromung – gemessene Masse m_1 abgezogen und mit der Erdbeschleunigung multipliziert wird (siehe Gleichung 6.6.1). Mit diesem Vorgehen lässt sich für jede gewählte Bestromung eine Kraft-Hub-Kennlinie ermitteln.



Bild 6.6.1 Veränderte Aufbau des Versuchsstands zur Kraft-Hub-Kennlinienmessung. Die dreidimensionale Darstellung zeigt nur die Messanordnung des Versuchsstands, der Tisch und der Wägebereich sind nicht zu sehen. 1 Haltemagnet; 2 Schwebemagnet; 3 Probegestänge; 4 Messlast; 5 Waage

$$F(z, I) = (m_0 - m_1) \cdot g \quad (6.6.1)$$

Direkte Bestimmung des Rastmoments und der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie

Die zu untersuchenden Magnetlager für den Einsatz in einer Magnetschwebewaage besitzen sehr kleine Rastmomente und Steilheiten der Drehmoment-Kennlinie. Zudem

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

darf durch die Messung dieser Größen der Schwebezustand nicht gestört werden. Daher sind Messgeräte, die zur Messung mechanisch an die schwebende Baugruppe gekoppelt werden, wie z.B. eine Federwaage, ungeeignet. Alternative Messgeräte zur direkten Bestimmung des Rastmoments sowie der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie gibt es derzeit nicht. Deshalb wird im Folgenden versucht diese Größen indirekt zu bestimmen. Dieses Vorgehen wird im nachfolgenden Abschnitt beschrieben. Trotz der beschriebenen Nachteile einer an der schwebenden Baugruppe mechanisch gekoppelten Federwaage kann bei Lagervarianten mit größeren Rastmomenten versucht werden das Rastmoment damit zu messen. Dazu liegt eine Federwaage mit einer Unterteilung von 0,05 N und einer Gesamtkraft von 1 N vor. Mit der gemessenen Kraft und dem Abstand zwischen dem Angriffspunkt der Federwaage und der Rotationsachse kann das Rastmoment berechnet werden.

Indirekte Bestimmung des Rastmoments und der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie

Wie bereits erklärt, sind das Rastmoment und die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nicht direkt messbar. Deshalb soll das Rotationsverhalten aufgezeichnet werden, um daraus Rückschlüsse auf das Rastmoment und die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie ziehen zu können. Für die Aufzeichnung des Rotationsverhaltens gibt es mehrere Möglichkeiten. Generell kann mittels Inkrementalgeber mit photoelektrischer Abtastung oder mit magnetischen Winkelsensoren das Rotationsverhalten aufgezeichnet werden. Jedoch haben sich beide Varianten in der Praxis, aufgrund zu geringer zulässiger Toleranzen zwischen Sensor und Messobjekt, als nicht geeignet erwiesen. Durch den Schwebezustand gibt es mehrere Freiheitsgrade, durch die die geforderten Toleranzen nicht eingehalten werden können. Es müssen z.B. für den magnetischen Winkelsensor Toleranzen von maximal 5 mm Arbeitsabstand und 0,4 mm axialen Versatz eingehalten werden. Diese lassen sich nicht einstellen, ohne den Schwebezustand zu stören. Deshalb soll die Rotation per Video aufgezeichnet werden. Dazu wird an der Unterseite der Messlast eine Scheibe mit Zeiger angebracht und darunter befindet sich eine Winkelscheibe mit 5 ° Unterteilungen (Bild 6.6.2). Zur Rotation angeregt wird jeweils mit einer um 1 mm zur Rotationsachse versetzten Druckbeaufschlagung mit einem Gas (Kapitel 6.3).

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

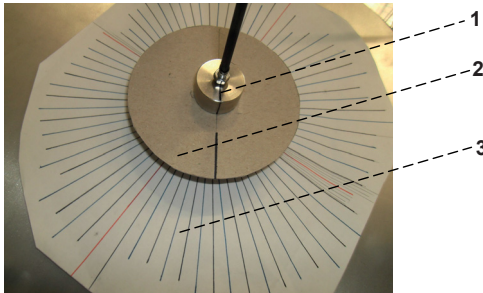


Bild 6.6.2 Aufbau für die Rotationsaufzeichnung per Video. 1 Messlast; 2 Scheibe mit Zeiger, angebracht an der Messlast; 3 Winkelscheibe

Bei einem rotationssymmetrischen Lager beginnt durch die Druckbeaufschlagung eine Drehung des Schwebemagneten, die nur durch die Luftreibung gedämpft wird. Ein rotationsfreies Lager weist dagegen ein Rastmoment auf. Dadurch dreht sich der Haltemagnet nach der Druckaufschlagung um einen bestimmten Winkel hin und her und eine Pendelbewegung entsteht. Aus dieser Pendelbewegung kann anhand der allgemeinen Schwingungsgleichung die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie berechnet werden. Dazu wird der Fall der freien Schwingung angewendet und bei hinreichend kleiner Dämpfung gilt für die Drehschwingung mit dem Trägheitsmoment J , der Drehfederkonstante c und der Winkelgeschwindigkeit ω [39], [40]:

$$\omega = \sqrt{\frac{c}{J}} \quad (6.6.2)$$

Weiterhin gilt für die Winkelgeschwindigkeit ω unter Berücksichtigung der Schwingungszahl k und der Schwingungsdauer t :

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{k}{t} \quad (6.6.3)$$

Durch Gleichsetzen von (6.6.2) und (6.6.3) gilt für die Steilheit c der Drehmoment-Kennlinie:

$$c = 4\pi^2 \frac{k^2}{t^2} \cdot J \quad (6.6.4)$$

6 – Untersuchungen und Methoden zur Entwicklung und Funktionsprüfung von Magnetlagern für eine Magnetschwebewaage

Die Berechnung des Trägheitsmoments für die schwebende Baugruppe ist im Anhang (Kapitel 12.2) zu finden.

Somit wird aus dem aufgezeichneten Rotationsverhalten die Schwingungsdauer und Schwingungszahl abgelesen und daraus die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie berechnet.

Zur Bestimmung des Rastmoments wird der Abstand zwischen Rotationsachse und Druckbeaufschlagung mit einem Gas (Kapitel 6.3) soweit vergrößert, bis der Schwebemagnet zu rotieren beginnt. Durch die Bestimmung dieses Abstands kann mit bekannter Kraft (92 mN durch Druckbeaufschlagung) das Rastmoment nach Gleichung (6.3.4) bestimmt werden.

Worst-case Prüfung

Die in Kapitel 6.3. vorgestellte worst-case Abschätzung kann auch als Prüfungsmethode verwendet werden. Dazu wird das Magnetlager eingebaut und mit einem Volumenstrom von 3 m³/h und einer Gaszuführung (Durchmesser 4 mm) 1 mm außermittig zur Rotationsachse beaufschlagt. Sofern anschließend eine Rotation auftritt, ist das notwendige Rastmoment nicht vorhanden. Bleibt der Schwebemagnet stabil und rotationsfrei, weist das zu prüfende Lager ein ausreichendes Rastmoment auf und das entsprechende Lager erfüllt die Aufgabe der vorliegenden Dissertation.

7 Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotations-symmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Im ersten Schritt gilt es, das rotationssymmetrische Magnetlager zur berührungsfreien Kraftübertragung genauer zu betrachten. Wie oben erwähnt, wird derzeit ein aktives Magnetlager in Form eines Elektromagneten verwendet, vertikal geregelt mit unterschaligem Aufbau. Der Permanentmagnet erzeugt die Hauptkraft. Der Aufbau ist in Bild 3.2 skizziert.

Aufgrund der Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit muss geklärt werden, inwieweit dieses Magnetlager optimal für die Anwendung in der Magnetschwebewaage geeignet ist, oder ob es bessere Lösungen für dieses Anwendungsgebiet gibt. Dazu wird zuerst ein Lastenheft aufgestellt, um die notwendigen Anforderungen an das Lager zu beschreiben.

7.1. Anforderungsprofil und Lastenheft

Um das benötigte Magnetlager optimal für die Anforderungen in der Magnetschwebewaage auszulegen, soll im Folgenden mit einem Lastenheft gearbeitet werden. Wie oben beschrieben, ist die Nutzung eines Magnetlagers mit dem skizzierten Aufbau in Bild 3.2 in der Magnetschwebewaage Stand der Technik. Das vollständig ausgefüllte Lastenheft ist in Tabelle 7.1.1 bis Tabelle 7.1.3 zu finden. Das für den Einsatz in der Magnetschwebewaage genutzte Magnetlager ist, aufgrund seiner Funktion nach [42], ein Kraftübertragungsmagnet und wird nach Kapitel 5.2 als polarisierter Elektromagnet ausgeführt. Die Grundform wird idealerweise als massive Topfform ausgeführt. Die Erregerspule ist eine Zylinderspule als geordnete / orthozyklische Drahtspule. Es wird nur eine Spule benötigt und der Arbeitsluftspalt befindet sich außerhalb der Spule. Durch die Kraftübertragung durch die Messzellenwand hindurch ergibt sich ein großer Arbeitsluftspalt und somit kann das Lager als Langhubmagnet bezeichnet werden. Die Bewegung ist translatorisch, ziehend und die Krafrichtung vertikal. Unter Punkt 6 wird ein Hub von ca. 5 mm benannt. Dieser ergibt sich aus dem aktuellen Stand der Technik.

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 7.1.1 Lastenheft des rotationssymmetrischen Lagers zur berührungsfreien Kraftübertragung – Teil I nach [42]

| |
|---|
| <p>1a) Magnettyp</p> <p><u>Funktion:</u> Kraftübertragungsmagnet - elektromagnetische Kupplung</p> <p><u>Eisenkreis:</u> Grundform - Topfform (axialsymmetrisch); Aufbau - massiv</p> <p><u>Art der Erregung:</u> Betriebsart - Gleichstrom mit permanenter Vormagnetisierung, Dauerbetrieb Einschaltdauer - ED = 100 % (Minimalstrom)</p> <p><u>Erregerspule:</u> Form - Zylinderspule Ausführung - Drahtspule - geordnet / orthozyklisch Anzahl - eine Spule</p> <p><u>Arbeitsluftspalt:</u> Lage - außerhalb der Spule Anzahl - ein Arbeitsluftspalt Größe - Langhubmagnet</p> <p><u>Art der Bewegung:</u> translatorisch - ziehend</p> |
| <p>1b) Kraftrichtung <u>vertikal</u></p> |
| <p>2) Zulässiges Bauvolumen / Bauraum / Befestigungsart</p> <p><u>Bauraum:</u> unbeschränkt</p> <p><u>Befestigungsart:</u> Haltemagnet - mechanische Kopplung an Waage Schwebemagnet - mechanische Kopplung an Probengestänge → Art der Befestigung: nicht festgelegt → Kraftverfälschung durch Krafteintrag durch die Befestigung vermeiden</p> |
| <p>3) Einbaulage bezogen auf die Wirkrichtung</p> <p><u>Einbaulage:</u> vertikal <u>Wirkrichtung:</u> vertikal</p> |
| <p>4) Kopplung des bewegten Teils mit der nachfolgenden Baugruppe</p> <p><u>mechanische Kopplung</u> Kraftverfälschung durch Krafteintrag durch Befestigung vermeiden</p> |
| <p>5) Rückstellung des bewegten Teils / zustellendes Medium / druckdichte Bauweise</p> <p><u>Rückstellung:</u> Anziehung: Magnetkraft Abstoßung: $I < 0$ und Gewichtskraft F_G</p> <p><u>Rückstellung ohne Medium</u> <u>Druckdichte Bauweise der Messzelle</u></p> |

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 7.1.2 Lastenheft des rotationssymmetrischen Lagers zur berührungsfreien Kraftübertragung – Teil II nach [42]

6) Hub / Drehwinkel / Kraft-Hub-Kennlinie / Moment-Winkel-Kennlinie / Gegenkraftkennlinie

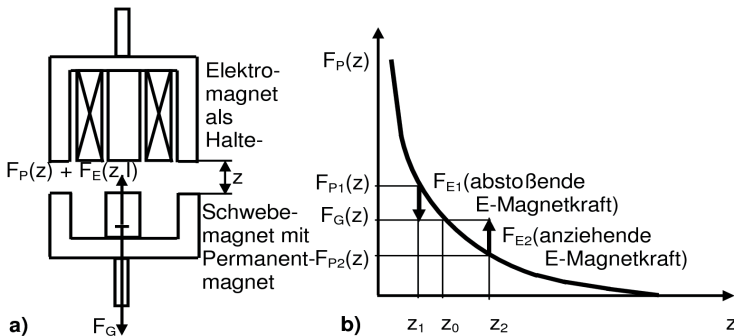
Hub: ca. 5mm (Nullpunktlage)

Drehwinkel (zul. Toleranzen) bzgl. Rotation: vorerst nicht relevant

Kraft-Hub-Kennlinie:

Haltemagnet: Elektromagnet

Schwebemagnet mit Permanentmagnet



Notwendige Kraft auf die schwebende Baugruppe: ca. 1 N (für 100g)

Moment-Winkel-Kennlinie: entfällt

Gegenkraftkennlinie:

entfällt (keine Feder, etc.) nur Gewichtskraft ($F_G = \text{konstant}$)

7) Elektrische Kontaktierung / Schutzart / Schutzleiteranschluss

Elektrische Kontaktierung: keine Vorgaben => Normstecker

Schutzart: keine Vorgaben

Schutzleiteranschluss: keine Vorgaben

8) Betriebsspannung / max. Stromaufnahme / Mindestschaltstrom

Betriebsspannung: keine Vorgaben

max. Stromaufnahme: keine Vorgaben

Mindestschaltstrom: keine Vorgaben

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 7.1.3 Lastenheft des rotationssymmetrischen Lagers zur berührungsfreien Kraftübertragung – Teil III nach [42]

| |
|---|
| 9) Klimatische Umgebungsbedingungen / Korrosionsschutz <u>klimatische Umgebungsbedingungen:</u> Haltemagnet: Luft, Normaldruck Schwebemagnet: korrosive Atmosphären (HCl, NO _x , SO ₂); Druck bis 50 bar <u>Korrosionsschutz:</u> Haltemagnet: kein Schutz notwendig Schwebemagnet: vor aggressive Medien schützen (Beschichtungen, Glaskapselung, etc.) |
| 10) Umgebungs-(Betriebs-)temperaturbereich / Maximal zulässige Magnetoberflächentemperatur / zusätzliche Kühlflächen <u>Temperaturbereich:</u> Haltemagnet: RT Schwebemagnet: RT bis 150 °C (Thermostatisierung) <u>Maximal zul. Magnetoberflächentemperatur:</u> Haltemagnet: entfällt, da unter RT Schwebemagnet: Permanentmagnet < 250 °C; Spulenwicklung < 200 °C <u>Zusätzliche Kühlflächen:</u> Haltemagnet: nicht erforderlich Schwebemagnet: Thermostatisierung |
| 11) relative Einschaltdauer (%ED bezogen auf 300s) <u>relative Einschaltdauer:</u> 100 %ED (Minimalstrom) <u>Arbeitsfrequenz:</u> irrelevant <u>Schaltzeiten:</u> irrelevant |

7.2. Auslegung und Berechnung

7.2.1. Berechnung des Magnetlagers

Wie in Kapitel 5.2 beschrieben, wird für die Erzeugung der Hauptkraft ein polarisierter Elektromagnet verwendet. Dieser soll im Folgenden ausgelegt und berechnet werden. Zur Bestimmung der optimalen Magnetlagergeometrie und der notwendigen Erregung erweisen sich FEM-Programme (Finite Element Methoden) als sinnvoll. Damit können entsprechende Modelle erzeugt werden, um über Parametrisierungen die optimalen Größenverhältnisse zu berechnen.

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebwaage

Durch obige theoretische Vorbetrachtungen haben sich die beiden folgenden Modelle in Bild 7.2.1.1 zur näheren Betrachtung bzw. Berechnung ergeben. Da die Modelle rotationssymmetrisch aufgebaut sind, ist jeweils nur die Darstellung des entsprechenden Schnitts notwendig. Die Lager sind jeweils aus einem Halte- und Schwebemagnet aufgebaut. Dabei besteht der Haltemagnet aus Eisenkern, Spule und Gehäuse. Der Schwebemagnet ist aus einem Rückschlussgehäuse und einem Permanentmagneten zusammengesetzt.

Zwischen Modell a) und Modell b) besteht der Unterschied in der Position des Permanentmagneten. In Modell a) wird der Permanentmagnet im Schwebemagneten vorgesehen und Modell b) sieht diesen im Haltemagneten vor, wobei der ursprüngliche Permanentmagnet im Schwebemagneten dann durch einen Eisendummy ersetzt wird, um eine Verfälschung des Messergebnisses wegen eines zu großen Luftspaltes zu verhindern.

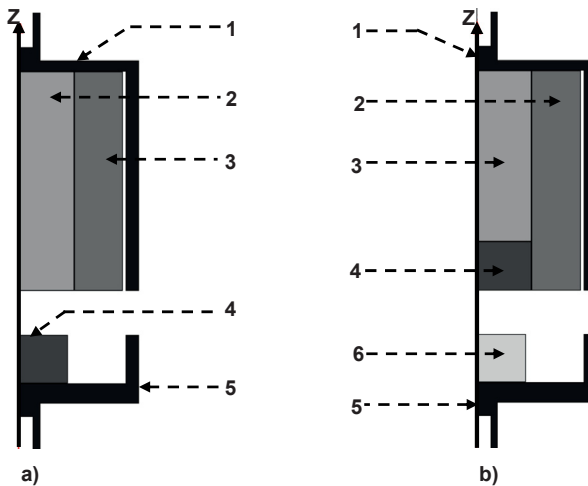


Bild 7.2.1.1 FEM-Modelle zur Berechnung der rotationssymmetrischen (zur Z-Achse) Lagervariante mit 1 Gehäuse Haltemagnet; 2 Eisenkern; 3 Spule; 4 Permanentmagnet; 5 Gehäuse Schwebemagnet; 6 Eisendummy. a) Permanentmagnet befindet sich im Schwebemagneten. b) Permanentmagnet befindet sich im Haltemagneten

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Der Abstand zwischen dem Halte- und Schwebemagnet stellt die Dicke der Messzellenwandung dar. In diesem Fall entspricht das 6,5 mm. Da das Material der Messzelle magnetisch neutral sein muss – um die Kraftübertragung nicht zu verfälschen – wird diese im Simulationsmodell nicht berücksichtigt. Die anderen Bauteile sind mit folgenden Materialiendaten (zugehörige B-H-Kennlinien sind in Kapitel 12.3 zu finden) in der Berechnung vorgesehen:

- Gehäuse Haltemagnet: Automatenstahl 11SMn30 (1.0715)
- Eisenkern: Automatenstahl 11SMn30 (1.0715)
- Gehäuse Schwebemagnet: Automatenstahl 11SMn30 (1.0715)
- Permanentmagnet: Samariumcobalt $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- Eisendummy: Automatenstahl 11SMn30 (1.0715)

Aus dem Lastenheft ist bekannt, dass ein Hub von 5 mm realisiert werden soll. Die notwendige Kraft über dem gesamten Hubbereich soll 1 N betragen. Generell zeigt sich aus den Berechnungsergebnissen, dass sich durch eine Höhen- und Durchmesservergrößerung des Lagers, die Magnetkraft erhöhen lässt. Dabei erhöhen sich jedoch auch der Platzbedarf und vor allem das Gewicht des Lagers, was sich wiederum negativ auf die spätere Wägegenauigkeit auswirkt.

Da dieses Lager für ausgiebige Versuche verwendet werden soll, ist eine Kraft von deutlich mehr als 1 N sinnvoll. Daher ergeben sich für das Lager ein Durchmesser von ca. 35 mm und eine Höhe des Gesamtlagers abzüglich Luftspalt (Abstand zwischen Halte- und Schwebemagnet) von ca. 51 mm.

Die Kraft-Hub-Kennlinien der beiden Varianten zeigt Bild 7.2.1.2. Daraus ist deutlich ersichtlich, dass die Variante 2 (Permanentmagnet im Haltemagnet) ein geringes Kraftniveau aufweist. Daher wird im Folgenden die Variante 1 (Permanentmagnet im Schwebemagnet) bevorzugt. Weitere Kraft-Hub-Kennlinien dieses Lagers sind in Bild 7.2.1.3 angegeben. Zum einen ist darin die Kennlinie bei einer Bestromung von 0 A eingezeichnet. Dadurch zeigt sich, welches Kraftniveau über Hub allein durch den Permanentmagneten realisiert werden kann. Und zum anderen wird die Kraft-Hub-Kennlinie ohne permanentmagnetische Erregung angegeben. Dazu muss der

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Permanentmagnet durch einen Eisendummy ersetzt werden, um den sonst entstehenden Fehler durch einen zu großen Luftspalt zu vermeiden. Das Diagramm lässt erkennen, dass die Hauptkraft durch den Permanentmagneten erzeugt wird. Dadurch ist das Lager energetisch günstig und wenig verlustbehaftet.

Bild 7.2.1.4 zeigt das Sättigungs- und Flussbild des ausgelegten Lagers. Die Sättigung des eingesetzten Materials im Lager ist nicht erreicht. Weiterhin sind einige Streuflüsse erkennbar. Diese lassen sich aufgrund des großen Abstandes von Halte- und Schwebemagnet nicht weiter reduzieren. Die der Berechnung hinterlegte B-H-Kennlinie des Automatenstahls 11SMn30 (1.0715) (Bild 12.3.1) und ein Datenblatt für das permanentmagnetische Material $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ (Tabelle 12.3.1) sind im Anhang (Kapitel 12.3) hinterlegt.

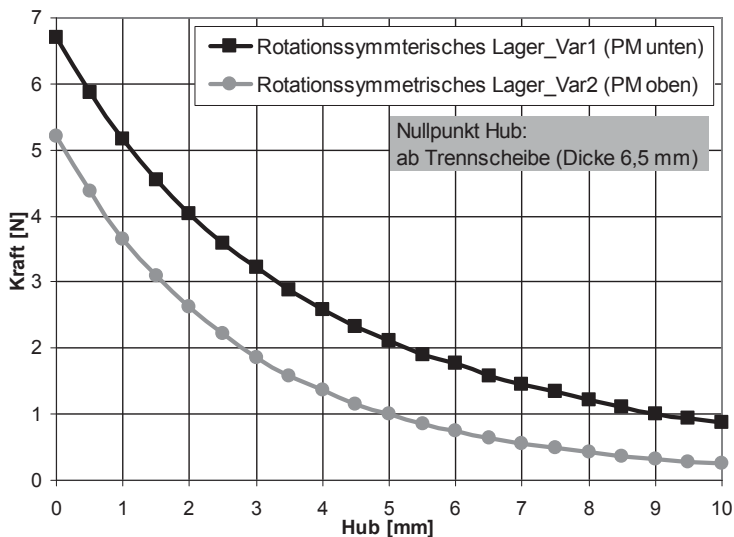


Bild 7.2.1.2 Kraft-Hub-Kennlinien der rotationssymmetrischen Varianten 1 und 2 mit dem jeweiligen Unterschied in der Lage des Permanentmagneten

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

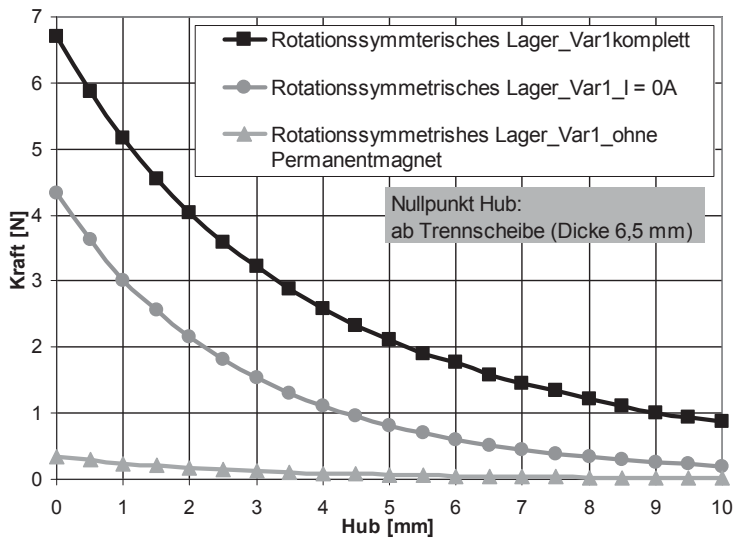


Bild 7.2.1.3 Kraft-Hub-Kennlinie der rotationssymmetrischen Magnetlagervariante 1 jeweils als komplettes Lager, ohne Bestromung und ohne permanentmagnetische Erregung

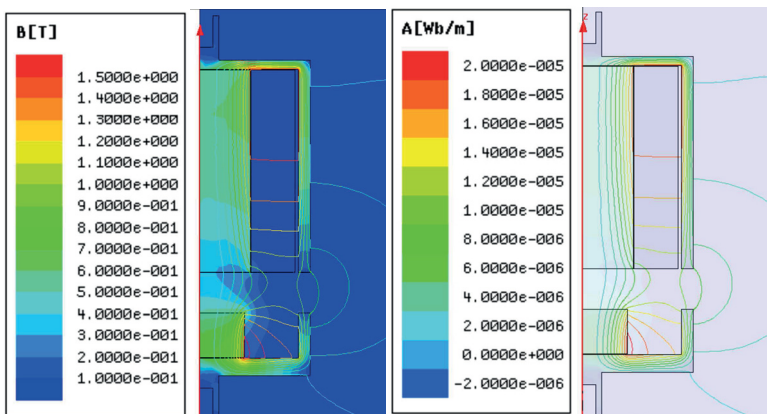


Bild 7.2.1.4 Magnetische Flussdichte (links) und Magnetfeldlinien (rechts) des Magnetlagers zur berührungslosen Kraftübertragung

7.2.2. Auslegung der Erregerwicklung und der Regelung

Mit Hilfe des Simulationsmodells ist es möglich die optimalen Geometrieverhältnisse des Lagers zu ermitteln. Im Modell muss der Bauraum für die Spule festgelegt und eine entsprechende Erregung eingestellt werden. Für die vorliegende Magnetlagervariante hat sich eine Durchflutung von 557 AW ergeben.

Für die Realisierung eines stabilen Schwebezustandes werden ein Lagesensor und ein PID-Regler benötigt. Dieser wird – wie in Kapitel 3 beschrieben – in der Standard Magnetschwebewaage genutzt und hat sich auch für vorliegende Aufgabenstellung als sinnvoll erwiesen.

Als Abstandssensor wird ein Differentialtransformator (LVDT) genutzt, der den gegebenen Geometrieverhältnissen (Durchmesser der Messzelle, Wandstärke, etc.) angepasst wurde, indem geeignete Abmessungen des Lagesensorkerns und der Lagesensorspule festgelegt wurden.

7.3. Ergebnisse aus der Berechnung des Magnetlagers

Das berechnete Magnetlager ist als polarisierter Elektromagnet ausgeführt und für einen unterschaligen Aufbau mit vertikaler Regelung vorgesehen. Bild 7.3.1 zeigt das Schnittbild des Lagers. Die zugehörige Kraft-Hub-Kennlinie ist in Bild 7.2.1.3 in Kapitel 7.2 zu finden.

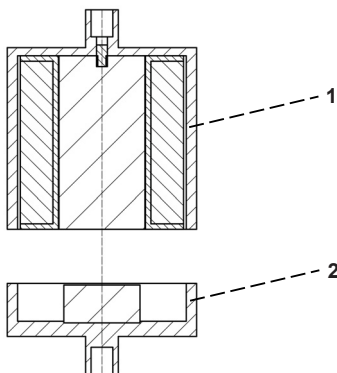


Bild 7.3.1 Schnittbild des rotationssymmetrischen Magnetlagers der Variante 1 bestehend aus Haltermagnet (1) und Schwebemagnet (2)

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Folgende Eckdaten des Magnetlagers haben sich ergeben:

- Durchmesser: ca. 35 mm
- Höhe des Gesamtlagers: ca. 51 mm
- Material beider Gehäuse, Eisenkern: Automatenstahl 11SMn30 (1.0715)
- Material Permanentmagnet: Samariumcobalt $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- Windungszahl: 3500
- Kupferdrahtdurchmesser: 0,2 mm
- Widerstand: 145 Ω DC
- Induktivität: 133 mH (1000 Hz)
- Leistung: 4 W
- Betriebsspannung: 24 V

7.4. Prüfung des rotationssymmetrischen Funktionsmusters

Im Folgenden wird das ausgelegte Funktionsmuster hinsichtlich Übereinstimmung zwischen Mess- und Berechnungsergebnissen der Kraft-Hub-Kennlinie überprüft.

Bestimmung der Kraft-Hub-Kennlinie

Zur Überprüfung der Vergleichbarkeit von Berechnungs- und Messergebnissen zeigt folgendes Diagramm (Bild 7.4.1) die berechnete und die gemessene Kraft-Hub-Kennlinie. Die Abweichung zwischen gemessener und berechneter Kennlinie liegt zwischen 3 und 10 %. Das sind zulässige Abweichungen zwischen FEM-Berechnung und den gemessenen Werten. Somit kann festgehalten werden, dass das FEM-Modell sehr gut mit den Messergebnissen übereinstimmt und somit als Grundlage für alle weiteren Berechnungen dienen kann.

7 – Untersuchungen zur Weiterentwicklung des rotationssymmetrischen Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

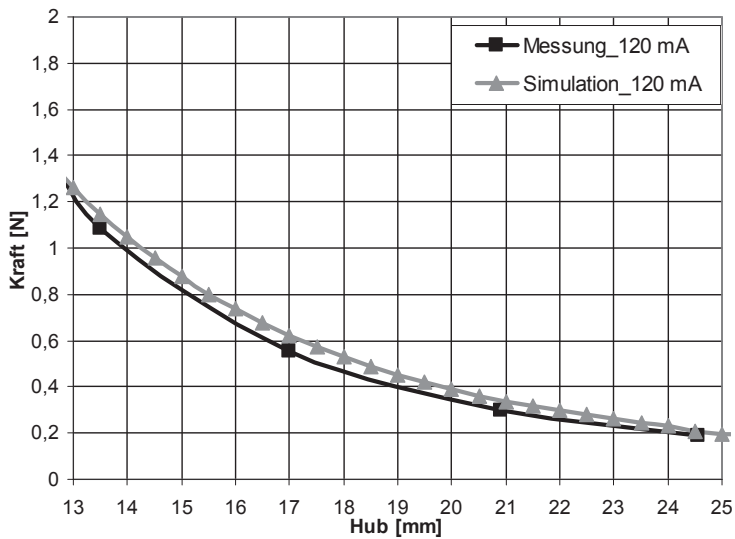


Bild 7.4.1 Vergleich der Simulations- und Messergebnisse hinsichtlich der Kraft-Hub-Kennlinie

8 Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Anwendung in einer Magnetschwebewaage beschrieben. Damit wird es möglich, zusätzlich zur Thermogravimetrie die Differenzthermoanalyse durchzuführen. Zunächst ist es erforderlich das Anforderungsprofil für eine solche Lagerung zu erstellen, um anschließend die generellen Möglichkeiten zur Realisierung festzustellen, gegeneinander abzuwägen und schließlich Zielführende Lösungen aufzubauen und zu prüfen.

8.1. Anforderungsprofil und Lastenheft

Das Ziel eine stabile rotationsfreie Schwebelagerung zu realisieren, beinhaltet generell zwei Aufgaben: Zum einen muss ein stabiler Schwebezustand zur berührungsfreien Kraftübertragung eingestellt und zum anderen ein rotationsfreies Halten ermöglicht werden. Es lassen sich beide Aufgaben mit einem Lager realisieren, aber auch in getrennten Lagern durchführen. Das Lastenheft zur Erstellung eines stabilen Schwebezustands zur berührungsfreien Kraftübertragung ist in Kapitel 7.1 zu finden. Dieses muss nun entweder mit den Anforderungen an eine rotationsfreie Lagerung ergänzt werden – für die Realisierung beider Aufgaben in einem Lager – oder es entsteht ein unabhängiges Lastenheft, für den Fall der Nutzung von zwei verschiedenen Lagervarianten. Daher wird im Folgenden nur die zusätzliche Aufgabe für das rotationsfreie Halten behandelt.

Die allgemeinen Anforderungen – wie z.B. klimatische Bedingungen, Lebensdauer, etc. – ändern sich für das rotationsfreie Lager nicht. Daher werden nur die für die stabile rotationsfreie Lagerung relevanten Punkte erklärt. Die Wirkungsrichtung für die berührungsfreie Kraftübertragung ist weiterhin die z-Achse und zusätzlich die Vermeidung der rotatorischen Bewegung um die z-Achse.

Durch die Messung der Proben- und Referenztemperatur mittels Pyrometrie ergeben sich folgende Anforderungen an das rotationsfreie Magnetlager:

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Probe und Referenz müssen in der Messzelle so positioniert werden, dass diese in der Flucht zum Pyrometer stehen. Daraus ergibt sich die Forderung von einer zulässigen Verdrehung kleiner 1° . Außerdem hat die Untersuchung zur Rotationsanregung (Kapitel 6.3) ein notwendiges Rastmoment von mindestens $92\text{ }\mu\text{Nm}$ ergeben, damit auch bei äußerer Anregung im worst-case Fall eine Rotation vermieden wird. Aus den genannten Forderungen an die maximal zulässige Verdrehung und an das Rastmoment folgt eine Anforderung an die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von mindestens $92\text{ }\mu\text{Nm/deg}$.

Aus [32] ist bekannt, dass ein stabiler Arbeitspunkt nur dann gegeben ist, wenn folgende Vorgaben erfüllt sind: Die Steigung der Drehmoment-Winkel-Kennlinie muss im Arbeitspunkt kleiner Null sein ($dM/d\alpha < 0$) und es dürfen keine Momente vorhanden sein ($\Sigma M = 0$). Sofern diese Anforderungen nicht erfüllt sind, kann eine stabile Lagerung nicht durchgeführt werden.

Weiterhin ist zu prüfen, ob durch das Magnetlager Querkräfte in der x- und y-Achse auf die schwebende Baugruppe entstehen. Diese würden die schwebende Baugruppe aus der Rotationsachse heraus bewegen. Je nach Aufbau der Lagerung wäre dann eine Verfälschung der Kraftübertragung und damit ein verfälschtes gravimetrisches Signal die Folge. Ursache dafür kann der Aufbau selbst sein. Das wäre möglich, wenn zum Beispiel zusätzlich Dauermagnete oder Spulen so angebracht sind, dass Kräfte in x- und y-Richtung entstehen können. Sind in diesem Fall die zentrierenden Kräfte des Lagers kleiner als die Querkräfte, wird der Schwebemagnet und damit die Probe aus der Rotationsachse heraus bewegt und die thermogravimetrische Messung ist verfälscht. Daneben kann es in der Praxis vorkommen, dass der Rotor außermittig zur Rotationsachse sitzt, z.B. beim Einstellen des Schwebezustands. Somit sind auch für diesen Fall die wirkenden Querkräfte zu berechnen. Im Folgenden werden diese für einen Versatz von $0,1\text{ mm}$ in der x-Achse mit F_x' und für $0,1\text{ mm}$ in der y-Achse mit F_y' bezeichnet. Es gilt somit die Querkräfte sowohl in mittiger als auch in außermittiger Position möglichst zu vermeiden. Ist dies nicht möglich, gilt es im Einzelfall zu prüfen, inwieweit durch eine Kalibrierung die Verfälschung des gravimetrischen Signals korrigiert werden kann.

Um die Probe und Referenz in der gewünschten Stellung zu positionieren, kann das Magnetlager aktiv oder passiv ausgeführt sein. Ein aktives Lager muss ausreichend viele Rastpositionen besitzen, um die Probe in der Flucht zum Pyrometer platzieren zu

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

können. Passive Lager können mit einem Stellmotor (Kapitel 6.2), der zwischen Haltemagnet und Waage angebracht ist, die Probe in die geforderte Position drehen. Dazu ist ein zusätzlicher konstruktiver Aufwand für die Anbringung eines Stellmotors notwendig.

Für die aktive Positionierung ist neben der PID-Regelung zur berührungsfreien Kraftübertragung eine zusätzliche Regelung notwendig. Generell bringt jede weitere Regelung eine zusätzliche Störanfälligkeit mit sich. Daher ist ein Lagerungsprinzip, welches ohne zusätzliche Regelung auskommt, nicht nur aus Gründen der erhöhten Kosten, vorzuziehen.

Neben den genannten Kriterien sind auch die Herstellungskosten, sowie der Aufwand für Konstruktion und Fertigung qualitativ für die einzelnen Lagerungsprinzipien abzuschätzen. Für zusätzlich – zum rotationssymmetrischen Magnetlager – benötigte Bauteile muss entsprechend auch der notwendige Bauraum in der Magnetschwebewaage berücksichtigt werden.

Aus den genannten Anforderungen lassen sich Kriterien ableiten, die zur Auswahl und Vergleichbarkeit geeigneter Lagervarianten dienen. Nachfolgend werden diese Auswahlkriterien aufgezählt:

- Kriterium 1: Ausreichendes Rastmoment: $M_{\text{Rast}} > 92 \mu\text{Nm}$
- Kriterium 2: Ausreichende Steilheit im Arbeitspunkt: $dM/d\alpha > 92 \mu\text{Nm/deg}$
- Kriterium 3: Stabiler Arbeitspunkt: $dM/d\alpha < 0$ und $\Sigma M = 0$
- Kriterium 4: Keine Querkräfte: $F_x = 0 \text{ N}$; $F_y = 0 \text{ N}$; $F_x' = 0 \text{ N}$; $F_y' = 0 \text{ N}$
- Kriterium 5: Aktive Positionierbarkeit
- Kriterium 6: Notwendigkeit einer zusätzlichen Regelung
- Kriterium 7: Konstruktion / Kosten

Folgendes Kapitel beschreibt die verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung der genannten Anforderungen in einem Magnetlager für eine Magnetschwebewaage. Anhand der aufgeführten Auswahlkriterien können unterschiedliche Lagervarianten verglichen und bewertet werden, um potentielle Lösungen in den nachfolgenden Kapiteln auszulegen, zu berechnen und auf Funktionalität zu prüfen.

8.2. Generelle Möglichkeiten zur Realisierung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die oben genannten Anforderungen in einer Magnetlagerung für die Magnetschwebewaage zu erfüllen. Wie bereits erwähnt, kann die berührungsfreie Kraftübertragung und die Rotationsfixierung in einem Lager umgesetzt werden oder es können dazu zwei getrennte Aufbauten verwendet werden. Dadurch entstehen eine Reihe unterschiedlicher Methoden, um das Ziel der vorliegenden Arbeit zu erreichen. Daher werden verschiedene – für diesen speziellen Anwendungsfall – geeignete Prinzipien in Tabelle 8.2.1 aufgezählt und diese anhand der Auswahlkriterien aus Kapitel 8.1 bewertet. Außerdem ist zum besseren Verständnis für jedes Lagerungsprinzip eine Skizze eines möglichen Aufbaus dargestellt. Diese ist jeweils nur als ein Beispiel zu verstehen, da es pro Funktionsprinzip mehrere Variationen gibt. Eine Erläuterung von vier verschiedenen Prinzipien findet im Folgenden statt. Im Anschluss daran ist es möglich eine Auswahl an Varianten zu treffen, die ausgelegt, berechnet und aufgebaut werden, um diese einem Funktionstest im Versuchsstand zu unterziehen.

Prinzip 1: Formänderung

An erster Stelle wird das Prinzip der Formänderung genannt. Darunter ist die Verwendung einer nicht rotationssymmetrischen Form der Gehäuse von Halte- und Schwebemagnet oder entsprechend von Eisenkern und Permanentmagnet zu verstehen. Die Rotation wird dabei aufgrund der Reluktanzkraft durch die Form selbst verhindert, d.h. der Schwebemagnet stellt sich immer so ein, dass der geringste magnetische Widerstand des Luftspalts zwischen Halte- und Schwebemagnet vorherrscht. Durch den größeren Hebelarm zwischen Gehäuse und Rotationsachse erzeugt die Formänderung am Gehäuse ein größeres Rastmoment als die Formänderung von Eisenkern und Permanentmagnet. Deshalb wird im Folgenden die Änderung der Form der beiden Gehäuse vorgezogen. Formänderungen von den Gehäusen können ganz unterschiedlich aussehen. Denkbar sind eine rechteckige oder quadratische Form genauso wie ein gezahntes Gehäuse und andere nicht rotationssymmetrische Formen.

Das Prinzip der Formänderung erzeugt ein vom Hub abhängiges Rastmoment, d.h. bei größer werdendem Hub verringern sich das Rastmoment und die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie. Mit einem Aufbau nach diesem Prinzip können nur relativ

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

kleine Momente erzeugt werden. Die Berechnungen bzw. Versuche in den folgenden Kapiteln zeigen, dass Kriterium 1 (ausreichendes Rastmoment) trotzdem erfüllt wird, allerdings die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie (Kriterium 2) den Forderungen nicht genügt.

Kriterium 3 mit den Erfordernissen für einen stabilen Arbeitspunkt lässt sich mit diesem Lagerungsprinzip erfüllen. Kriterium 4 bewertet das Vorhandensein von Querkräften. Das Lager zentriert sich selbst, d.h. der Schwebemagnet befindet sich mit der entsprechenden Form des Gehäuses direkt unter dem Haltemagneten und bewegt sich ohne Einwirkung einer äußeren Kraft nicht aus dieser Lage heraus. Daher sind im Arbeitspunkt keine Kräfte in x- und y-Richtung vorhanden.

Das Lager kann sich nicht aktiv in der z-Achse drehen (Kriterium 5). Eine Drehung kann nur mit einem zusätzlichen Stellmotor erreicht werden. Für die Vermeidung der Rotation selbst ist keine zusätzliche Regelung notwendig (Kriterium 6). Weiterhin ist der konstruktive Aufwand sehr gering und somit das Lager kostengünstig (Kriterium 7). Das Prinzip der Formänderung kann mit zusätzlichen Permanentmagneten oder Spulen erweitert werden. Dadurch sind höhere Rastmomente und eine größere Steilheit der Momentenkennlinie realisierbar. Die Kriterien 1 und 2 gelten damit als erfüllt. Die zusätzlichen Permanentmagnete können in unterschiedlicher Weise angeordnet werden. Es bietet sich an, ein gezahntes Gehäuse zu nutzen und in den Aussparungen bzw. Lücken Permanentmagnete vorzusehen, so ist es auch in Tabelle 8.2.1 skizziert. Andere Varianten sind ebenfalls möglich. Gleiches gilt für die zusätzliche Anbringung von Spulen. Allerdings besitzen Dauermagnete im Gegensatz zu Spulen eine höhere Energiedichte und sind damit zu bevorzugen.

Die Kriterien 3 bis 7 können, wie beim Prinzip der Formänderung ohne zusätzliche Erregung, bewertet werden. Einziger Unterschied ist, dass durch die zusätzlichen Permanentmagnete oder Spulenwicklungen zusätzliche Kosten entstehen.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 8.2.1 Übersicht der verschiedenen Entwicklungsmöglichkeiten zur Realisierung einer rotationsfreien Lagerung in der Magnetschwebewaage

| Prinzip Nummer Kriterien | 1) Formänderung | | 2) Rastierung | | 3) Drehfeld | | 4) Aktives Lager mit Rastierung / Drehfeld | |
|--|---|---|---|---|---|---|--|--|
| | ohne zusätzliche Erregung | mit zusätzl. elektrischer / permanent-magnetischer Erregung | ohne zusätzl. Erregung | mit permanent-magnetischer Erregung | ohne zusätzl. Erregung | mit permanent-magnetischer Erregung | ohne zusätzl. Erregung | mit permanent-magnetischer Erregung |
| Kriterium 1 $M_{\text{Resist}} > 92 \mu\text{Nm}$ | 1-1 erfüllt | 1-2 erfüllt | 2-1 erfüllt | 2-2 erfüllt | 3-1 erfüllt | 3-2 erfüllt | 4-1 erfüllt | 4-2 erfüllt |
| Kriterium 2 $dM/d\alpha > 92 \mu\text{Nm/deg}$ | nicht erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt |
| Kriterium 3 $dM/d\alpha < 0, \Sigma M = 0$ | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt |
| Kriterium 4 $F_x = F_y = F_x' = F_y' = 0\text{N}$ | erfüllt | erfüllt | bedingt | bedingt | bedingt | bedingt | minimiert | minimiert |
| Kriterium 5 Aktiv positionierbar? | nicht erfüllt | nicht erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt |
| Kriterium 6 zusätzliche | nicht notwendig | nicht notwendig | notwendig | notwendig | kompliziert | kompliziert | kompliziert | kompliziert |
| Kriterium 7 Konstruktion / Kosten | •einfacher Aufbau •günstig | •komplizierte Gehäuseform •zusätzl. PMs/Spulen | •kompliziertes Rotordesign •zusätzl. Spulen | •kompliziertes Rotordesign •zusätzl. Spulen und PMs | •einfaches Rotordesign •komplizierter Spulenaufbau (teuer!) | •einfaches Rotordesign •komplizierter Spulenaufbau (teuer!) | •kompliziertes Rotordesign •zusätzl. Spulen | •kompliziertes Rotordesign •zusätzl. Spulen •zusätzl. Lagesensor und Regelung •zusätzl. PMs |
| Skizze Beispiele |  |  |  |  |  |  | | |

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Prinzip 2: Rastierung

Bei dem Prinzip der Rastierung wird ein Lageraufbau gewählt, mit dem lokale Kräfte erzeugt werden können. Gelangt der Rotor in den Wirkungsbereich dieser lokalen Kräfte, wird dieser angezogen bis die Symmetrielinie der Zahnung des Rotors mit der Wirkrichtung der lokalen Kraft übereinstimmt. Dort rastet der Rotor ein, da er stabil in dieser Position gehalten wird. Dazu wird die Reluktanzkraft genutzt. Somit funktioniert dieses Lager ähnlich wie ein Schrittmotor [33], [42], [46]. Zum Aufbau eines solchen Lagers, wird das rotationssymmetrische Lager aus Kapitel 7 verwendet und mit einem Rotor und Stator ergänzt (s. Skizze in Tabelle 8.2.1 und Bild 8.2.1). Rotor und Stator werden auf gleicher Höhe zwischen Schwebemagnet und Probe angebracht, wobei der Rotor am Probengestänge sitzt und der Stator außerhalb der Messzelle angeordnet ist. Der Rotor besitzt zwischen zwei und n Zähne und kann aus Stahl oder einem permanentmagnetischen Material bestehen. Im zweiten Fall ergibt sich nach Tabelle 8.2.1 das Prinzip der Rastierung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung. Der Stator enthält zwischen 2 und n Spulen, die auf einem Gehäuse angebracht sind. Dieses Gehäuse erfüllt zum einen die Aufgabe die Spulen an der entsprechenden Position zu halten und es kann zusätzlich als Rückschlussgehäuse dienen. Je nachdem besteht der Stator aus einem magnetisch leitenden oder nicht leitenden Material. Durch das Rückschlussgehäuse (magnetisch leitendes Material) verstärken sich zwar die vorherrschenden Kräfte auf den Rotor, allerdings erhöhen sich damit auch die je nach Lageraufbau und Sitz des Rotors auftretenden unerwünschten Querkräfte auf den Rotor und auch bei abgeschalteter elektrischer Erregung kann ein Restmagnetismus bleiben, der entsprechende Momente und Kräfte erzeugt.

Mit diesem Aufbau lassen sich die Auswahlkriterien 1 bis 3 – ein genügendes Rastmoment, eine ausreichende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie sowie ein stabiler Arbeitspunkt – erfüllen. Durch die zusätzliche permanentmagnetische Erregung (Rotor aus permanentmagnetischen Material) ergeben sich ein größeres Rastmoment sowie eine höhere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie.

Bei der Lagervariante mit dem Prinzip der Rastierung treten Querkräfte auf, wenn die Reluktanzkräfte am Rotor nicht symmetrisch angreifen. Dies wird durch einen entsprechenden Aufbau und ein geeignetes Verhältnis von Zahnanzahl zu Spulenanzahl verhindert. Zudem herrschen Querkräfte vor, wenn der Rotor außermittig zur Rotationsachse im Stator angeordnet ist. Die Größe dieser Querkräfte ist bei jeder

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Variante entsprechend zu berechnen. Durch die Verwendung eines Rückschlussgehäuses, z.B. aus Stahl, verstärken sich die Querkräfte deutlich und sie verbleiben auch bei abgeschalteter Erregung durch Restmagnetismus teilweise bestehen.

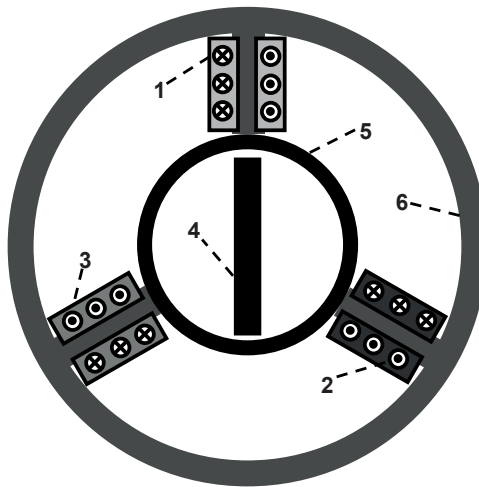


Bild 8.2.1 Schematischer Aufbau eines Magnetlagers nach dem Prinzip der Rastierung.
1 Spule 1; 2 Spule 2; 3 Spule 3; 4 Rotor (aus Stahl oder permanentmagnetischen Material); 5 Messzelle (aus magnetisch neutralen Material); 6 Stator (aus magnetisch nicht leitenden Material) bzw. ausgeführt als Rückschlussgehäuse (aus magnetisch leitenden Material)

Das Prinzip der Rastierung ermöglicht ein aktives Drehen des Schwebemagneten nach Kriterium 5 (Kapitel 8.1), sofern ein entsprechendes Verhältnis zwischen Zahnanzahl und Spulenanzahl gegeben und die Anordnung entsprechend angepasst ist. Dazu muss eine zusätzliche Regelung vorgesehen werden (Kriterium 6).

Der konstruktive Aufwand ist bei diesem Prinzip größer als bei dem der Formänderung. Es müssen zusätzlich ein Rotor am Probengestänge und ein Stator außerhalb der Messzelle angebracht werden. Beide benötigen entsprechenden Bauraum. Es gilt dabei einen genügend großen Abstand zwischen der rotationssymmetrischen Lagerung bestehend aus Halte- und Schwebemagnet und dem Rotor und Stator einzuhalten, damit sich die entstehenden Magnetfelder beider Lager nicht beeinflussen

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

und damit unerwünschte Kräfte bzw. Momente erzeugen. Außerdem sollte der Rotor aus gleichen Gründen nicht zu nahe am Wegsensor (LVDT) angeordnet werden. Weiterhin muss der Rotor aus permanentmagnetischen Material vor zu hohen Temperaturen geschützt werden, um die zulässige Curie-Temperatur des Materials nicht zu überschreiten. Dies geschieht entweder durch ausreichenden Abstand zwischen Rotor und Ofen oder durch eine zusätzliche Kühlung auf der Höhe der Rotoranordnung. Durch die Nutzung von permanentmagnetischen Material sowie weiteren Spulen am Stator kommen zusätzliche Kosten hinzu (Kriterium 7, Kapitel 8.1).

Prinzip 3: Drehfeld

Weiterhin kann eine rotationsfreie Lagerung mit der Nutzung eines Drehfeldes realisiert werden [47] - [48]. Dazu ist ein Rotor mit zwei Zähnen und außerhalb der Messzelle ein Aufbau mit drei Spulen erforderlich, mit denen ein Drehfeld erzeugt werden kann. Dabei kann der Rotor ebenfalls aus Stahl oder aus einem permanentmagnetischen Material bestehen. Im zweiten Fall ergibt sich eine Variante mit zusätzlicher Erregung. Der Stator enthält drei Spulen in einem Gehäuse, das auch aus magnetisch leitendem Material besteht und somit als Rückschlussgehäuse dient, oder aus einem nicht leitenden Material und damit nur die Funktion der Spulenhaltung erfüllt. Bild 8.2.2 zeigt schematisch im Schnittbild den Aufbau von Rotor und Stator.

Alle Varianten – sowohl mit und ohne zusätzliche permanentmagnetische Erregung als auch mit und ohne Rückschlussgehäuse – können theoretisch ein ausreichendes Rastmoment (Kriterium 1), sowie genügend Steilheit (Kriterium 2) der Drehmoment-Kennlinie erzeugen. Stabile Arbeitspunkte sind ebenfalls vorhanden.

Für die auftretenden Querkkräfte (Kriterium 4) gelten prinzipiell die gleichen Anmerkungen wie auch für das Prinzip der Rastierung. Um symmetrisch angreifende Kräfte auf den Rotor zu erzeugen, und damit Querkkräfte zu vermeiden, soll zum stabilen Halten des Rotors jeweils nur eine Spule bestromt werden. Erst für das gezielte Drehen ist eine nacheinander erfolgende Bestromung aller drei Spulen notwendig. Jedoch entstehen trotzdem Querkkräfte bei einem Rotorversatz in x- bzw. y-Richtung aus der Rotationsachse heraus. Diese sind für die jeweiligen Varianten im Einzelnen zu berechnen. Durch die Verwendung eines Rückschlussgehäuses verstärken sich die wirkenden Querkkräfte deutlich.

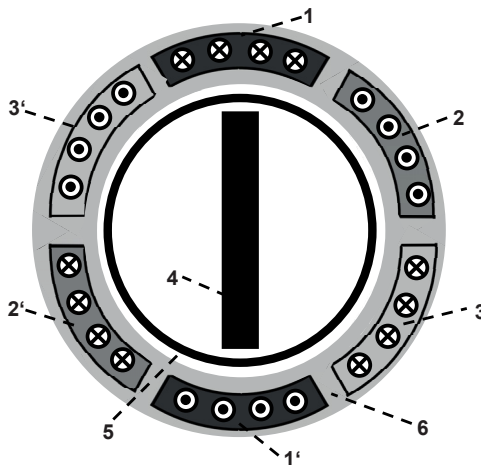


Bild 8.2.2 Schematischer Aufbau eines Magnetlagers nach dem Prinzip des Drehfelds mit den Spulen 1 - 3 und 1' - 3', sowie dem Rotor (4) (aus Stahl oder permanentmagnetischen Material), der Messzelle (5) (aus magnetisch neutralen Material) und dem Stator (magnetisch nicht leitenden Material) bzw. Eisenrückschlussgehäuse (6) (aus magnetisch leitenden Material)

Der größte Vorteil dieses Lagerungsprinzips besteht in der aktiven Positionierbarkeit (Kriterium 5). Dazu ist zusätzlich ein komplizierter Regelaufbau notwendig (Kriterium 6). Der Rotor lässt sich relativ leicht aufbauen, wohingegen die Realisierung einer entsprechenden Spulenwicklung sehr aufwendig und teuer in der Herstellung ist (Kriterium 7).

Prinzip 4: Aktive Lagerung mit Rastierung / Drehfeld

Die vierte Methode ist eine aktive Lagerung. Dabei wird das Prinzip der Rastierung [33], [42], [46] oder des Drehfeldes [47] - [48] zusammen mit einem zusätzlichen Abstandssensor genutzt. Dieser soll den Abstand zwischen Rotor und Stator ermitteln, um eine gegebenenfalls außermittige Rotorposition korrigieren zu können. Dadurch lassen sich die Querkräfte in x- und y-Richtung regulieren. Die anderen Eigenschaften dieser Lagervariante entsprechen dem jeweilig gewählten Prinzip Rastierung oder Drehfeld, mit dem Unterschied, dass für den Abstandssensor zusätzlich eine

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

aufwendige Regelung erforderlich ist.

Wie Tabelle 8.2.1 zeigt, sind die unterschiedlichen Prinzipien mehr oder weniger für eine rotationsfreie Lagerung in der Magnetschwebewaage geeignet. Daher wird in folgendem Kapitel eine Auswahl der näher zu untersuchenden Lagervarianten für die rotationsfreie Lagerung in einer Magnetschwebewaage getroffen, die nach den oben beschriebenen Prinzipien arbeiten.

8.3. Ausgewählte Lagervarianten zur näheren Betrachtung

Anhand der Auswahlkriterien aus Kapitel 8.1 ist ersichtlich, welche der beschriebenen Prinzipien für die Entwicklung einer rotationsfreien Lagerung in einer Magnetschwebewaage geeignet sind. In der Darstellung in Tabelle 8.2.1 zeigt das Prinzip der Formänderung die meisten Vorteile. Dieses Lagerungsprinzip lässt sich konstruktiv sehr einfach umsetzen, ist kostengünstig und benötigt keine weitere Regelung. Es bietet sich an, ein quadratisches Gehäuse von Schwebe- und Haltemagneten vorzusehen oder die beiden Gehäuse mit einer Zahnstruktur zu versehen. Die Zahnstruktur bietet den Vorteil, dass mehrere Rastpositionen eingenommen werden können. Je nach Zahnanzahl können das mehr Positionen sein, als bei der quadratischen Variante. Beide Varianten mit der Bezeichnung 1-1-a (quadratisches Gehäuse) und 1-1-b (gezahntes Gehäuse) werden in den folgenden Kapiteln näher beschrieben, berechnet, ausgelegt und schließlich deren Funktion geprüft.

Wie in Tabelle 8.2.1 gezeigt, kann nur mit einer zusätzlichen Erregung ein genügend großes Rastmoment und eine ausreichende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erzeugt werden. Die zusätzliche Erregung kann elektrisch mit weiteren Spulenwicklungen erfolgen oder durch das Anbringen von Permanentmagneten. Da moderne permanentmagnetische Materialien im Gegensatz zu Spulenwicklungen eine erhöhte Energiedichte besitzen, bietet es sich an das Prinzip der Formänderung mit einer Zahnstruktur umzusetzen und darin die Permanentmagnete anzubringen. Dieses Prinzip ist konstruktiv sehr einfach umsetzbar und es wird keine zusätzliche Regelung benötigt. Einziger Nachteil sind die Kosten für die zusätzlichen Permanentmagnete. Auch dieses Prinzip der Lagerung wird mit der Bezeichnung 1-2 in den nächsten

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Kapiteln ausführlich behandelt.

In einer weiteren detaillierten Untersuchung werden die Lagervarianten mit dem Rastierungsprinzip behandelt. Der Vorteil dieses Prinzips ist die aktive Positionierbarkeit. Einziger Nachteil ist das mögliche Auftreten von Querkraften in x- und y-Richtung. Daher ist zu klären, inwieweit diese Kräfte durch einen optimierten Aufbau minimiert oder vermieden werden können. Es werden dazu in den folgenden Kapiteln Varianten ohne (Bezeichnung 2-1) und mit (Bezeichnung 2-2) permanentmagnetische Erregung sowie mit und ohne Verwendung eines Rückschlussgehäuses untersucht.

Auch das Prinzip zur Lagerung mit einem Drehfeld wird genauer untersucht. Dazu erfolgen ausführliche Berechnungen und die Auslegung dieses Lagers. Dieses Prinzip besticht mit der genauesten Positionierbarkeit des Rotors und ist in diesem Punkt allen anderen Lagern überlegen. Inwieweit die in x- und y-Richtung auf den Rotor wirkenden Querkraften minimiert oder vermieden werden können, ist ebenfalls zu prüfen. Die Bezeichnung 3-1 (ohne zusätzliche Erregung) und 3-2 (mit permanentmagnetische Erregung) werden dazu im Folgenden verwendet.

Die in der Tabelle 8.2.1 in der vierten Spalte genannten aktiven Lager werden zu diesem Zeitpunkt nicht näher untersucht. Der zusätzlich notwendige Lagesensor zwischen Rotor und Stator verursacht einen zu komplizierten Aufbau für die Anwendung in einer Magnetschwebewaage. Es wären dafür konstruktive Änderungen am Gesamtaufbau notwendig, dazu gehört unter anderem die Verwendung von speziellem Material für die Messzelle an der zur Lagemessung vorgesehenen Position, um den Abstand fehlerfrei messen zu können. Da dies sehr aufwendig ist, werden daher vorzugsweise die anderen Lagerprinzipien so ausgelegt, dass die Querkraften reduziert oder sogar vermieden werden können.

Tabelle 8.3.1 zeigt die in diesem Kapitel zur näheren Untersuchung ausgewählten Lagervarianten. In den folgenden Kapiteln werden daher diese Varianten näher betrachtet, ausgelegt, berechnet und auf Funktionalität geprüft.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 8.3.1 Übersicht der geplanten Varianten zur näheren Untersuchung auf Eignung für eine rotationsfreie Lagerung

| Prinzip | 1) Formänderung | | | 2) Rastierung | | 3) Drehfeld | |
|----------------------|-----------------|-------|----------------------|----------------------------------|----------------------|--------------------------------|----------------------|
| Varianten-Nr. | 1-1-a | 1-1-b | 1-2-a bis 1-2-j | 2-1-a bis 2-1-i | 2-2-a bis 2-2-i | 3-1-a | 3-2-a |
| Ausführung | eckig | Zähne | Zähne | Rotor: X Zähne Y Statorspulen | | 2-Zahn Rotor 3 Statorspulen | |
| zusätzliche Erregung | ohne | ohne | permanent-magnetisch | ohne | permanent-magnetisch | ohne | permanent-magnetisch |

8.4. Berechnung und Auslegung verschiedener rotationsfreier Magnetlager

Das vorhergehende Kapitel hat die verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung eines rotationsfreien Magnetlagers für eine Magnetschwebewaage – zur simultanen Durchführung von Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse – aufgezeigt. Anhand der Auswahlkriterien aus Kapitel 8.1 haben sich einige Varianten ergeben, die nun detailliert betrachtet werden sollen (siehe Tabelle 8.3.1). Dazu gehört die Berechnung, Auslegung und anschließend die Prüfung auf Funktionalität am Versuchsstand. Zuerst erfolgt die Berechnung der Varianten, um im anschließenden Kapitel die Ergebnisse mit der Funktionsprüfung zu bestätigen und zusammenzustellen.

8.4.1. Prinzip: Formänderung mittels quadratischen Gehäuses ohne zusätzliche Erregung

Zuerst wird eine quadratische Form der Gehäuse von Schwebe- und Haltemagnet gewählt, ohne eine zusätzliche permanentmagnetische oder elektrische Erregung vorzusehen. Für die Berechnung der Drehmoment- und Kraft-Hub-Kennlinie sind dreidimensionale FEM-Berechnungen notwendig. Dazu wird ein Modell, wie in Bild 8.4.1.1 dargestellt, aufgebaut. Um den notwendigen Bauraum für das Lager nicht stark zu vergrößern, werden die Größenverhältnisse des rotationssymmetrischen Lagers aus Kapitel 7 als Grundlage verwendet. Hier wurde ein Durchmesser von ca. 35 mm gewählt. Daher wird das Lager mit einer quadratischen Form der Gehäuse von Schwebe- und Haltemagnet mit einer Breite und Länge jeweils von 35 mm ausgeführt.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Die Höhen des Halte- und Schwebemagneteten bleiben gleich zum rotationssymmetrischen Lager (Kapitel 7.3).

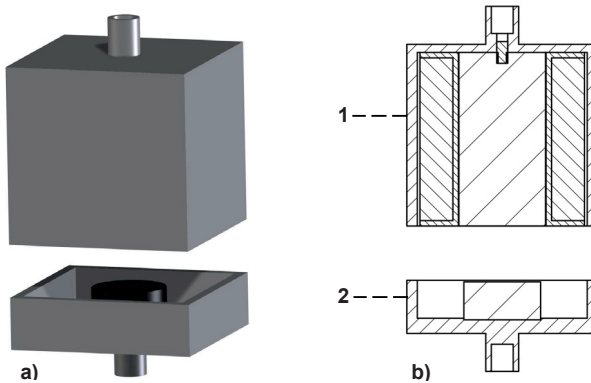


Bild 8.4.1.1 Darstellung des rotationsfreien Lagers (1-1-a) nach dem Prinzip der Formänderung mit quadratischen Gehäusen von Halte- und Schwebemagnet. a) Dreidimensionale Darstellung. b) Schnittzeichnung mit Haltemagnet (1) und Schwebemagnet mit Permanentmagnet (2)

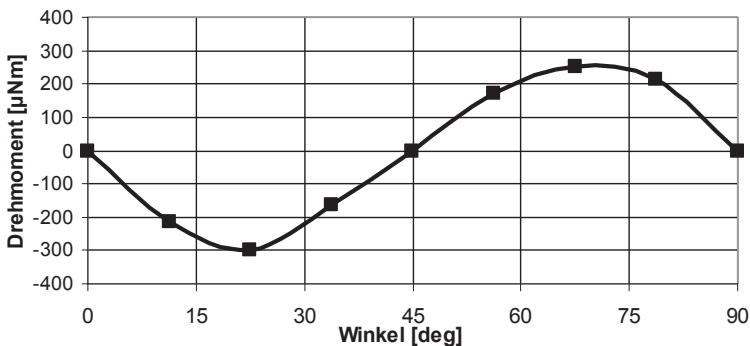


Bild 8.4.1.2 Drehmoment-Kennlinie des rotationsfreien Lagers (1-1-a) nach dem Prinzip der Formänderung mit quadratischen Gehäuse von Halte- und Schwebemagnet

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Bild 8.4.1.2 zeigt die Drehmoment-Kennlinie. Daraus lassen sich ein Rastmoment von $-250 \mu\text{Nm}$ und eine Steigung der Drehmoment-Kennlinie von $-19 \mu\text{Nm/deg}$ berechnen. Damit ist die Forderung nach einem ausreichend hohen Rastmoment (Kriterium 1) erfüllt, jedoch weist diese Lagervariante eine ungenügende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie (Kriterium 2) auf. Somit ist diese Variante zur rotationsfreien Lagerung in einer Magnetschwebewaage nicht geeignet.

Für die Auslegung zur Ansteuerung bzw. Regelung sind keine weiteren Berechnungen notwendig. Es kann der PID-Regler der rotationssymmetrischen Lagervariante aus Kapitel 7 verwendet werden.

8.4.2. Prinzip: Formänderung mittels Zahnung ohne zusätzliche Erregung

Folgendes Kapitel zeigt die Realisierung einer Lagervariante nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnung ohne zusätzliche Erregung. Dabei bleibt die Gehäuseform rund, wird zusätzlich aber gezahnt. Bild 8.4.2.1 a) zeigt beispielhaft ein Magnetlager nach diesem Prinzip mit 8 Zähnen. Im Folgenden muss geklärt werden, mit welcher Zahnanzahl und Zahngeometrie (Zahnhöhe, Zahnfläche) eine geeignete Variante zur rotationsfreien Lagerung realisiert werden kann.

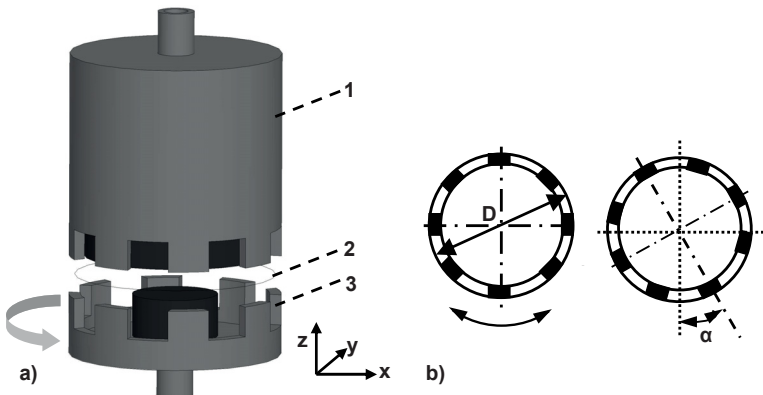


Bild 8.4.2.1 a) Dreidimensionales FEM-Modell der gezahnten Lagervariante ohne zusätzliche permanentmagnetische Erregung mit Haltemagnet (1) und Schwebemagnet (2) sowie einer Kreislinie (3) zur Anzeige der magnetischen Flussdichte und bei Erweiterung auf eine Kreisfläche zur Anzeige des magnetischen Flusses über die Zahnstruktur. b) Draufsicht auf den Schwebemagneten mit Zahnstruktur und dem Verdrehwinkel α

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Dafür ist die Betrachtung der Drehmoment-Kennlinie erforderlich, die mit einer dreidimensionalen FEM-Berechnung durchgeführt werden kann. Allerdings ist diese sehr zeitaufwendig. Deshalb wird für eine Grobabschätzung zuerst mit einer analytischen Methode gearbeitet. Anschließend können mit der FEM-Berechnung die Ergebnisse verfeinert und vervollständigt werden.

Grobabschätzung mit einer analytischen Methode

Mit der analytischen Berechnung kann der Einfluss der Zahnanzahl und der Zahngeometrie (Zahnhöhe, Zahnfläche) auf das Drehmoment bzw. die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie ermittelt werden [42] - [44]. Anhand eines magnetischen Ersatzschaltbildes kann der Flussverlauf über die Zähne dargestellt werden. In Bild 8.4.2.2 ist dies bei sich gegenüberliegenden Zähnen zu sehen (der Schwebemagnet ist nicht verdreht) und in Bild 8.4.2.3 ist die Abbildung für den um einen Winkel α zum Haltemagneten verdrehten Schwebemagneten dargestellt.

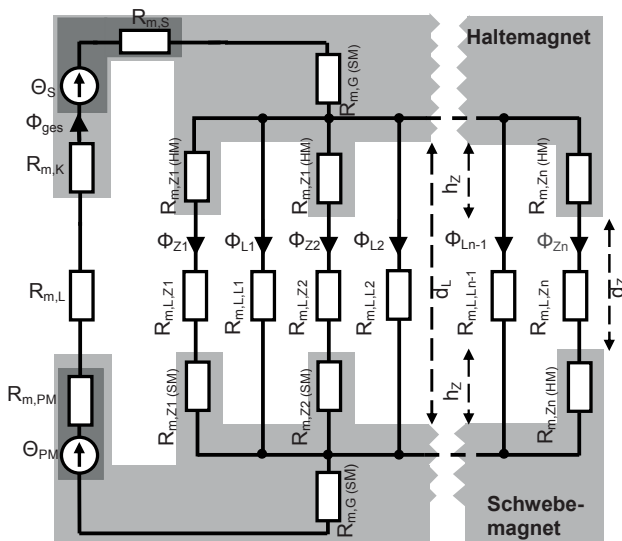


Bild 8.4.2.2 Magnetisches Ersatzschaltbild für die Lagervariante nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnstruktur

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

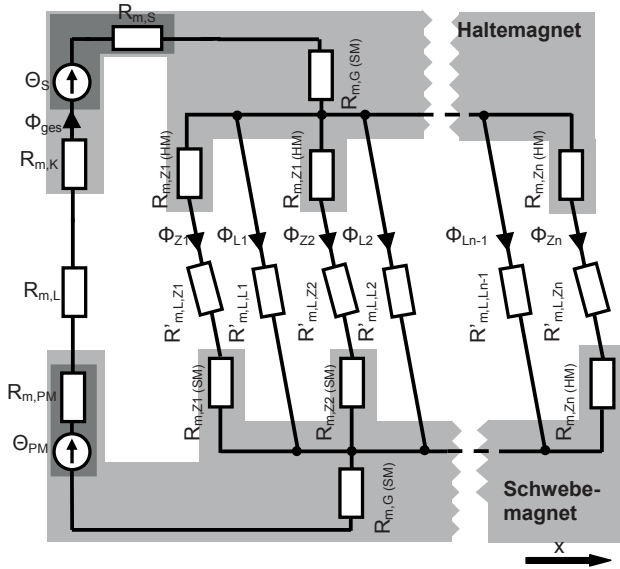


Bild 8.4.2.3 Magnetisches Ersatzschaltbild für die Lagervariante nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnstruktur bei verschobenen Schwebemagneten

Aus dem zweidimensionalen Modell (Bild 7.2.1.1) kann der magnetische Fluss über dem Luftspalt zwischen Halte- und Schwebemagnet bestimmt werden. Dieser beträgt $8 \mu\text{Wb}$ und entspricht dem magnetischen Gesamtfluss Φ_{ges} aus Bild 8.4.2.2 und kann nach Gleichung (8.4.2.1) berechnet werden.

$$\Phi_{\text{ges}} = \Phi_{Z1} + \Phi_{L1} + \Phi_{Z2} + \Phi_{L2} + \dots + \Phi_{Ln-1} + \Phi_{Zn} \quad (8.4.2.1)$$

Weiterhin lässt sich zusammen mit den magnetischen Leitwerten jeweils für den Luftspalt zwischen den Zähnen ($G_{m,L,Zn}$) und den Lücken ($G_{m,L,Ln-1}$) die magnetische Durchflutung Θ bestimmen nach:

$$\Theta = \Theta_S + \Theta_{PM} = \frac{\Phi_{\text{ges}}}{G_{m,L,Ln-1} + G_{m,L,Zn}} \quad (8.4.2.2)$$

$$G_{m,L,Z1} = G_{m,L,Z2} = \dots = G_{m,L,Zn} = \frac{1}{R_{m,L,Zn}} = \frac{\mu_0 \cdot A_Z}{d_Z}; \quad (8.4.2.3)$$

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Der magnetische Leitwert für den Luftspalt zwischen den Lücken ($G_{m,L,Ln-1}$) lässt sich analog zu Gleichung (8.4.2.3) bestimmen.

Im nächsten Schritt wird das wirkende Moment auf eine Zahn-Lücke-Kombination bei verdrehten Schwebemagneten berechnet. Dazu gilt das Ersatzschaltbild nach Bild 8.4.2.3. Für die magnetischen Leitwerte jeweils für den Luftspalt zwischen den Zähnen ($G'_{m,L,Zn}$) und den Lücken ($G'_{m,L,Ln-1}$) gilt in diesem Fall nach [42]:

$$G'_{m,L,Z1} = G'_{m,L,Z2} = \dots = G'_{m,L,Zn} = \frac{1}{R'_{m,L,Zn}} = \frac{\mu_0 \cdot A_z \cdot \cos \beta_z}{d_z}; \quad (8.4.2.4)$$

Analog können die magnetischen Leitwerte für den Luftspalt zwischen den Lücken ($G'_{m,L,Ln-1}$) bestimmt werden. Der Winkel β zur Bestimmung des magnetischen Leitwertes nach (8.4.2.4) ist in Bild 8.4.2.4 dargestellt.



Bild 8.4.2.4 Vergrößerte Darstellung des magnetischen Widerstands für den Flussverlauf nach Bild 8.4.2.3 [42]

Somit kann der Winkel α zur Drehung um die Rotationsachse im dreidimensionalen Modell nach Bild 8.4.2.1 b) in den Winkel β zur Berechnung des magnetischen Widerstands nach Bild 8.4.2.4 umgerechnet werden, indem (8.4.2.9) in (8.4.2.10) und (8.4.2.11) eingesetzt wird. Dabei ist D der Durchmesser des Magnetlagers und x der Weg in x -Richtung nach Bild 8.4.2.3.

$$x = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot \pi \cdot D \quad (8.4.2.5)$$

$$\tan \beta = \frac{d_z}{x}; \quad \tan \beta = \frac{d_L}{x} \quad (8.4.2.6)$$

$$(8.4.2.7)$$

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Weiterhin kann das Moment M_n auf eine Zahn-Lücke-Paarung nach [42] berechnet werden:

$$M_n = \frac{\Theta^2}{2} \cdot \left(\frac{d(G'_{m,L,Ln-1}(\beta_L))}{d\beta_L} + \frac{d(G'_{m,L,Zn}(\beta_Z))}{d\beta_Z} \right) \quad (8.4.2.8)$$

Aus der Ableitung ergibt sich das wirkende Moment M_n auf eine Zahn-Lücke-Paarung:

$$M_n = -\frac{\Theta^2}{2} \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{A_L \cdot \sin\beta_L}{d_L} + \frac{A_Z \cdot \sin\beta_Z}{d_Z} \right) \quad (8.4.2.9)$$

Für das Gesamtmoment M_{ges} muss die Anzahl der Zahn-Lücke-Paarungen mit dem Moment M_n aus Gleichung (8.4.2.13) multipliziert werden:

$$M_{ges} = M_n \cdot \text{Anzahl}_{\text{Zahn-Lücke-Paarung}} \quad (8.4.2.10)$$

Aus dem Gesamtmoment kann die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie bestimmt werden. Diese wird im Folgenden für die Verdrehung um den Winkel α von 1 deg ermittelt (s. Auswahlkriterien in Kapitel 8.1).

Anhand der vorgestellten Berechnung kann die Abhängigkeit der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von den Parametern Zahnfläche und Zahnhöhe berechnet werden. Dazu werden jeweils die anderen beiden Parameter konstant gehalten werden. Die Abhängigkeit der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von der Zahnanzahl kann mit diesem Modell nicht bestimmt werden. Dies liegt darin begründet, dass in der Berechnung der Gesamtfluss auf die Zähne und Lücken gleichmäßig aufgeteilt und danach das berechnete Moment auf eine Zahn-Lücke-Paarung mit der Anzahl der Zähne wieder multipliziert wird.

Zur Klärung der Abhängigkeit der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von der Zahnfläche, wird die Zahnfläche A_Z um einen Flächenfaktor a von 0,01 bis 100 im Vergleich zu den Flächen der Lücken A_L vergrößert:

$$A_Z = a \cdot A_L \quad (8.4.2.11)$$

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Die Ergebnisse der Berechnung bei variierendem Flächenfaktor a und konstanter Zahnanzahl und Zahnhöhe sind in Bild 8.4.2.5 dargestellt. Dabei zeigt die Kennlinie ein Maximum bei einem Flächenfaktor von 0,5. Das heißt, wenn die Zahnfläche halb so groß ist wie die Lückenfläche, ergibt sich ein Maximum der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie.

In der dritten Untersuchung wird die Abhängigkeit der Zahnhöhe auf die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie bestimmt. Hierzu sind die Anzahl der Zähne und die Flächen von Zahn und Lücke konstant zu halten. In Bild 8.4.2.5 ist die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie in Abhängigkeit von der Zahnhöhe zu sehen. Es wird ein linearer Zusammenhang sichtbar, d.h. bei Erhöhung der Zahnhöhe vergrößert sich die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie.

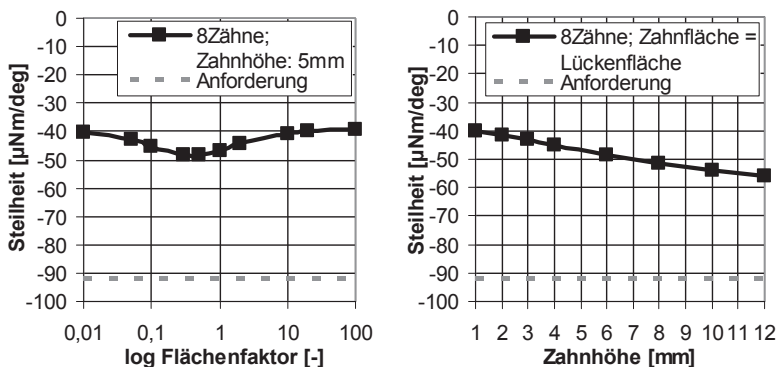


Bild 8.4.2.5 Abhängigkeit der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie, a) von dem Flächenfaktor zur Veränderung der Zahnfläche zur Lückenfläche (a) und von der Zahnhöhe (b)

Aus den Berechnungen ergeben sich somit folgende Erkenntnisse: Eine Aussage über die Abhängigkeit der Drehmoment-Kennlinie von der Anzahl der Zähne kann mit der analytischen Berechnung nicht getroffen werden. Die Variation der Zahnflächen im Vergleich zu den Lückenflächen verändert die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie, allerdings nicht drastisch. Dabei entsteht bei einem Flächenfaktor von 0,5 nach Gleichung (8.4.2.11) ein Maximum. Außerdem vergrößert sich die Steilheit der

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Drehmoment-Kennlinie bei steigender Zahnhöhe. Aus diesen Ergebnissen ist somit tendenziell erkennbar, dass eine möglichst große Zahnhöhe anzustreben ist und die Flächen der Zähne halb so groß sein sollten, wie die Flächen der Lücken. Generell liegen die, mit dieser Methode abgeschätzten Rastmomente, unter den Anforderungen.

Da es sich hierbei nur um eine Abschätzung handelt, wird im Folgenden eine FEM-Berechnung für detailliertere Ergebnisse genutzt. Außerdem kann damit der genaue Flussverlauf zwischen dem Gehäuse des Halte- und Schwebemagneten festgestellt und das auftretende Drehmoment exakter ermittelt werden.

3D-FEM Modell

Die oben beschriebene analytische Lösung dient nur zur Grobabschätzung einer geeigneten Zahngeometrie und des damit erzeugten Rastmoments und der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie. Daher wird im Folgenden ein dreidimensionales FEM-Modell verwendet, mit dem die zu erwartenden Drehmomente in Abhängigkeit der Zahnanzahl, Zahnhöhe und Zahnfläche genauer bestimmt werden können. Weiterhin ist damit der genaue Flussverlauf über die Zahnstruktur zu ermitteln. Bild 8.4.2.1 zeigt beispielhaft ein dreidimensionales Modell der gezahnten Variante mit acht Zähnen.

Die Ergebnisse der FEM-Berechnungen sind in Bild 8.4.2.6 zu finden. Bild 8.4.2.6 a) zeigt die Abhängigkeit der Zahnanzahl auf die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie. Daraus ist erkennbar, dass vier Zähne eine größere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erzeugen, als acht Zähne. Bild 8.4.2.6 b) enthält den Zusammenhang zwischen Steilheit der Drehmoment-Kennlinie und dem Flächenfaktor. Dabei wird die Fläche der Zähne wie in (8.4.2.11) verändert. Bei einem Flächenfaktor von 0,3 bzw. 0,5 entsteht ein Maximum der Steilheit. Weiterhin kann die Steilheit durch eine zunehmende Zahnhöhe angehoben werden (Bild 8.4.2.6, c).

Der Vergleich zwischen der dreidimensionalen FEM-Berechnung und der analytischen Berechnung zeigen, dass zwar der Verlauf qualitativ ähnlich ist, aber quantitativ nicht übereinstimmt. Dies kann mit der dreidimensionalen Aufzeichnung der magnetischen Flussdichte in Vektordarstellung erklärt werden. Diese ist beispielhaft in Bild 8.4.2.7 für eine Zahnanzahl von acht, einer Zahnhöhe von 5 mm und einem Flächenfaktor von 0,5

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

zu sehen. Es lässt sich deutlich erkennen, dass an den Zähnen ein Streufluss radial nach außen bzw. nach innen stattfindet. Dieser wird in der analytischen Berechnung nicht berücksichtigt. Weiterhin verläuft der größte Anteil des magnetischen Flusses über die Zähne und kaum über die Lücken. Dies bestätigt auch Bild 8.4.2.8, welches die magnetische Flussdichte über Umfang des Magnetlagers darstellt. Zudem zeigt Bild 8.4.2.9 die zugehörige Drehmoment-Kennlinie. Daraus kann eine Steigung der Drehmoment-Kennlinie von $-43,9 \mu\text{Nm/deg}$ berechnet werden.

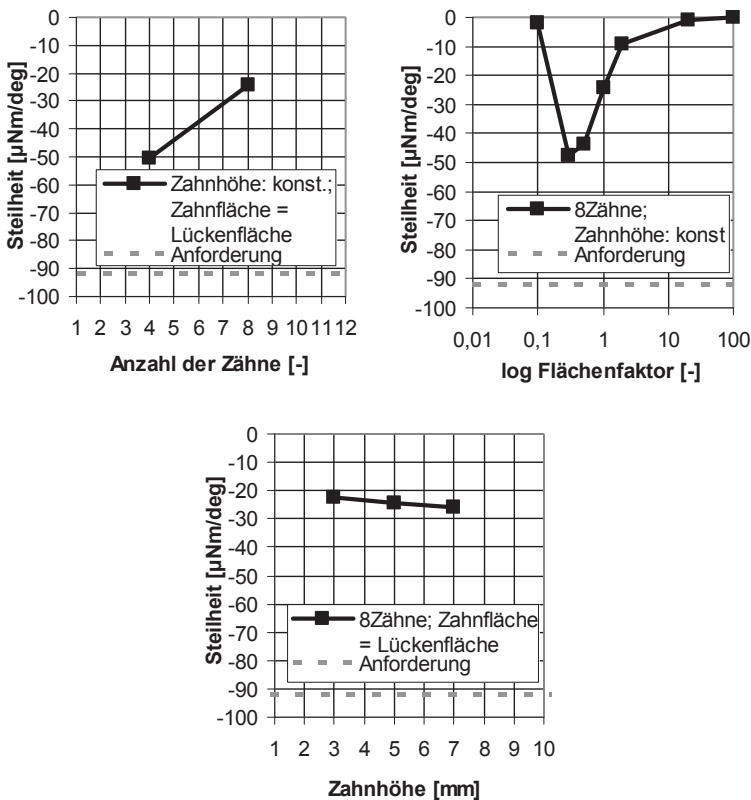


Bild 8.4.2.6 Darstellung der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie in Abhängigkeit der Anzahl der Zähne, des Flächenfaktors und der Zahnhöhe

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

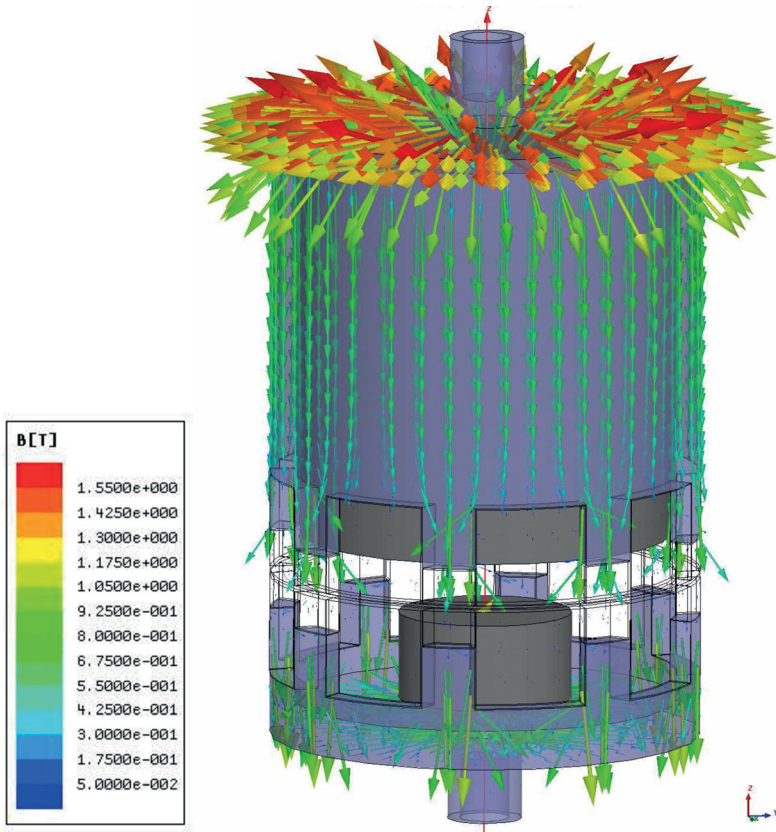


Bild 8.4.2.7 Magnetische Flussdichte des Magnetlagers nach dem Prinzip der Formänderung mit 8 Zähnen, 5 mm Zahnhöhe und einem Flächenfaktor von 0,5 in Vektordarstellung

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

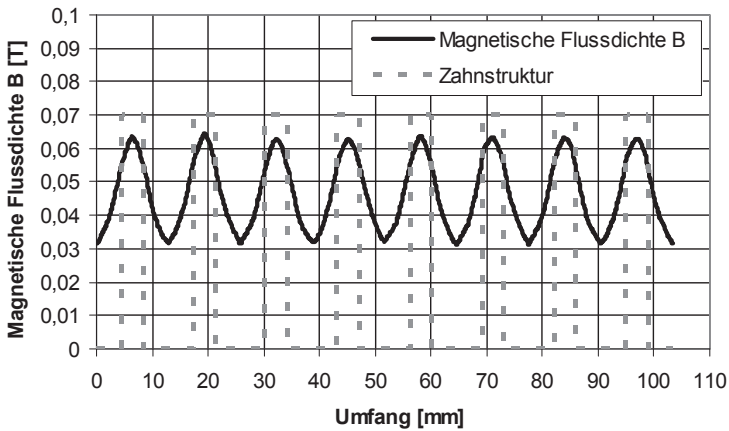


Bild 8.4.2.8 Magnetische Flussdichte über dem Umfang des Magnetlagers nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnstruktur mit 8 Zähnen, 5 mm Zahnhöhe und einem Flächenfaktor von 0,5

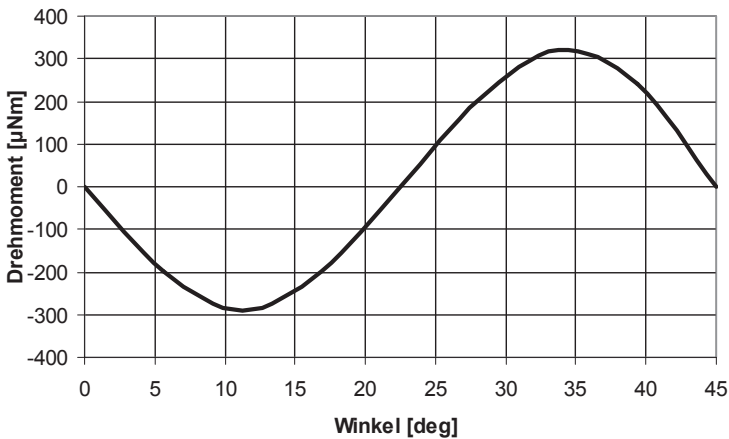


Bild 8.4.2.9 Drehmoment über dem Verdrehwinkel für das Magnetlager nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnstruktur mit 8 Zähnen, 5 mm Zahnhöhe und einem Flächenfaktor von 0,5

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der analytischen Grobabschätzung und der dreidimensionalen FEM-Berechnung zeigen, dass die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie durch folgende Parameter erhöht werden kann: Es gibt ein optimales Verhältnis zwischen Zahn- und Lückenfläche. Dieses liegt bei ca. 0,3 bzw. 0,5 nach Zusammenhang in (8.4.2.11). Weiterhin kann durch Vergrößerung der Zahnhöhe, sowie die Verwendung von vier statt acht Zähnen die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie vergrößert werden.

Deutlich erkennbar ist, dass die analytische Grobabschätzung und die dreidimensionalen FEM-Berechnungen die gleiche qualitative Tendenz zeigen, allerdings unterscheiden sich beide Modelle quantitativ deutlich. Das liegt daran, dass der theoretisch angenommene Flussverlauf im analytischen Modell (Bild 8.4.2.2 und Bild 8.4.2.3) nicht dem der dreidimensionalen FEM-Berechnung (Bild 8.4.2.7) entspricht, wobei dieser der Realität näher kommt. Daher dient die analytische Berechnung nur zur groben Abschätzung der Parameter Zahnhöhe und Zahnfläche. Mit dem analytischen Modell ist – wie oben gezeigt – die Abhängigkeit des Moments von der Zahnanzahl nicht zu bestimmen. Eine detaillierte quantitative Betrachtung kann dann mit dem dreidimensionalen Modell erfolgen und die Auswirkung der Zahnanzahl und Zahngeometrie auf das Moment ermittelt werden.

Die Berechnungen haben außerdem gezeigt, dass die Variante mit 4 Zähnen, einem Flächenfaktor von 0,3 bzw. 0,5 und mit möglichst hohen Zähnen, die größte Steilheit der Drehmoment-Kennlinie ergibt. Trotzdem sind mit dieser Anpassung der Zahnanzahl, der Zahnhöhe und des Flächenfaktors die Forderungen bezüglich einer ausreichenden Steilheit der Drehmoment-Kennlinie (Kriterium 2, Kapitel 8.1) nicht erfüllt, wohingegen nach Kriterium 1 (Kapitel 8.1) ein genügend hohes Ratmoment vorhanden ist. Trotzdem soll diese Lagervariante hinsichtlich Funktion geprüft werden, um die Werte zwischen Berechnung und Messung abzugleichen. Da im nächsten Kapitel diese Zahnstruktur für die zusätzliche permanentmagnetische Erregung ebenfalls verwendet wird, bietet es sich an eine Zahnung herzustellen, die für möglichst viele verschiedene Größen und Lagepositionen von zusätzlichen Permanentmagneten in der Zahnstruktur genutzt werden kann. Deshalb wird dieses Lager mit 4 Zähnen, einem Flächenfaktor von 1 und einer Zahnhöhe von 5 mm

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

ausgeführt. Ohne zusätzliche permanentmagnetische Erregung trägt diese Variante die Bezeichnung 1-1-b.

Die Lagervariante nach dem Prinzip der Formänderung benötigt keine zusätzliche Regelung. Daher genügt die Verwendung des PID-Reglers der rotationssymmetrischen Lagervariante aus Kapitel 7.

8.4.3. Prinzip: Formänderung mittels Zahnung mit zusätzlicher Erregung

Für die Auslegung der Lagervarianten nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnung und zusätzlicher Erregung, werden die Erkenntnisse aus Kapitel 8.4.2 verwendet. Diese zeigen, dass eine Zahnung mit vier Zähnen eine höhere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie hervorruft, als eine Zahnung mit acht Zähnen. Daher werden im Weiteren die dreidimensionalen FEM-Berechnungen mit vier Zähnen durchgeführt. Dazu kann das FEM-Modell aus Kapitel 8.4.2 verwendet und um die zusätzlichen Dauermagnete erweitert werden. Für eine große Variationsbreite der Permanentmagnetgröße und -anordnung, werden außerdem eine Zahnhöhe von 5 mm und nach (8.4.2.11) ein Flächenfaktor von 1 gewählt.

Durch die zusätzliche permanentmagnetische Erregung können höhere Rastmomente sowie eine größere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erzeugt werden. Dabei können die Permanentmagnete an verschiedenen Positionen – jeweils nur am Halte- bzw. Schwebemagneten oder an beiden, sowie in den Lücken als auch auf den Zähnen – platziert werden. Außerdem gilt es, die Magnetisierungsrichtung der einzelnen Permanentmagnete so zu verändern, dass nach Kriterium 2 (Kapitel 8.1) eine ausreichende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erreicht wird. Folgende Übersicht (Bild 8.4.3.1) zeigt eine Auswahl der berechneten Varianten. Dabei ist die Zahnung des Halte- und Schwebemagneten dargestellt und die Permanentmagnete sind mit der jeweiligen Magnetisierungsrichtung grau hinterlegt. Dabei sind die Magnetisierungsrichtungen auch in Bezug zur Magnetisierungsrichtung des im Schwebemagneten mittig sitzenden Permanentmagneten zu berücksichtigen (Bild 7.3.1). Dieser Permanentmagnet ist ebenfalls in z-Richtung axial magnetisiert und entspricht damit in seiner Magnetisierungsrichtung den Permanentmagneten in Variante 1-2-a.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

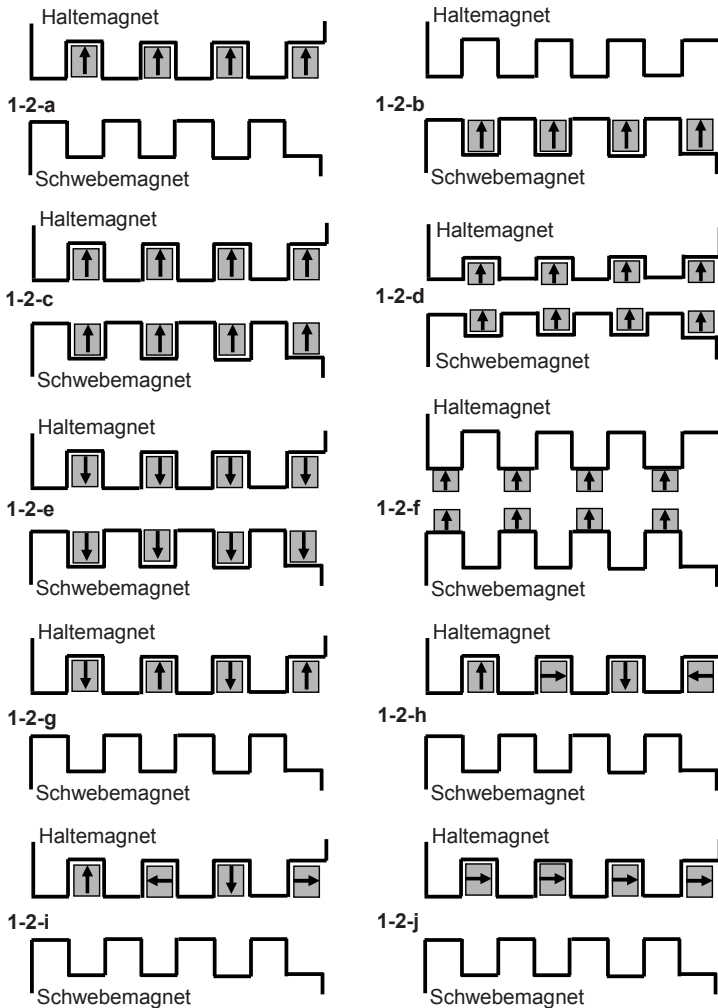


Bild 8.4.3.1 Übersicht der berechneten Varianten 1-2-a bis 1-2-j nach dem Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Die Varianten 1-2-a und 1-2-b in Bild 8.4.3.1 zeigen für alle vier Permanentmagnete die gleiche Magnetisierungsrichtung in axialer Achse, unterscheiden sich allerdings in der Platzierung. Variante 1-2-a enthält die zusätzliche permanentmagnetische Erregung im Halte- und Variante 1-2-b im Schwebemagnet. Variante 1-2-c beinhaltet sowohl im Halte- als auch im Schwebemagneten Permanentmagnete. Eine erniedrigte Zahnhöhe ist der einzige Unterschied zwischen 1-2-c und 1-2-d. Die nächste Variation 1-2-e zeigt die umgekehrte Magnetisierung wie in Variante 1-2-c und 1-2-f platziert die Permanentmagnete dagegen auf den Zähnen statt in den Lücken.

In der Variante 1-2-g werden die Dauermagnete jeweils umgekehrt magnetisiert im Haltemagneten angebracht. Varianten 1-2-h und 1-2-i beinhalten die Magnetisierung nach dem Halbach Array [45], jeweils im und gegen den Uhrzeigersinn. Und in 1-2-j sind alle Magnete in radialer Magnetisierung enthalten.

Bild 8.4.3.2 enthält für die Varianten aus Bild 8.4.3.1 die Berechnungsergebnisse für die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie und die magnetische Flussdichte über dem Umfang des jeweiligen Magnetlagers aufgetragen. Der Vergleich von Variante 1-2-a und 1-2-b zeigt, dass sich die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie beider Varianten nur geringfügig unterscheidet. Der Hauptanteil des magnetischen Flusses verläuft bei beiden Varianten über die Zähne.

Die Anbringung von Permanentmagnete im Halte- und Schwebemagneten in Variante 1-2-c besitzt dagegen eine deutliche Steigerung – um ca. das 6-fache im Vergleich zu Variante 1-2-a und 1-2-b – der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie. Nachteilig ist dabei das zusätzliche Gewicht von weiteren Permanentmagneten und außerdem verläuft der magnetische Fluss zum Großteil über die Lücken.

Die Wirkung der Umkehrung der Magnetisierungsrichtung der Dauermagnete – der im Schwebemagneten mittig sitzende Permanentmagnet besitzt somit eine entgegengesetzte Magnetisierungsrichtung – zeigt der Vergleich von Variante 1-2-c und Variante 1-2-e. Der Aufbau 1-2-e führt zu einem Flussverlauf größtenteils über die Lücken. Damit folgt für Variante 1-2-e eine kleinere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie als für Variante 1-2-c.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

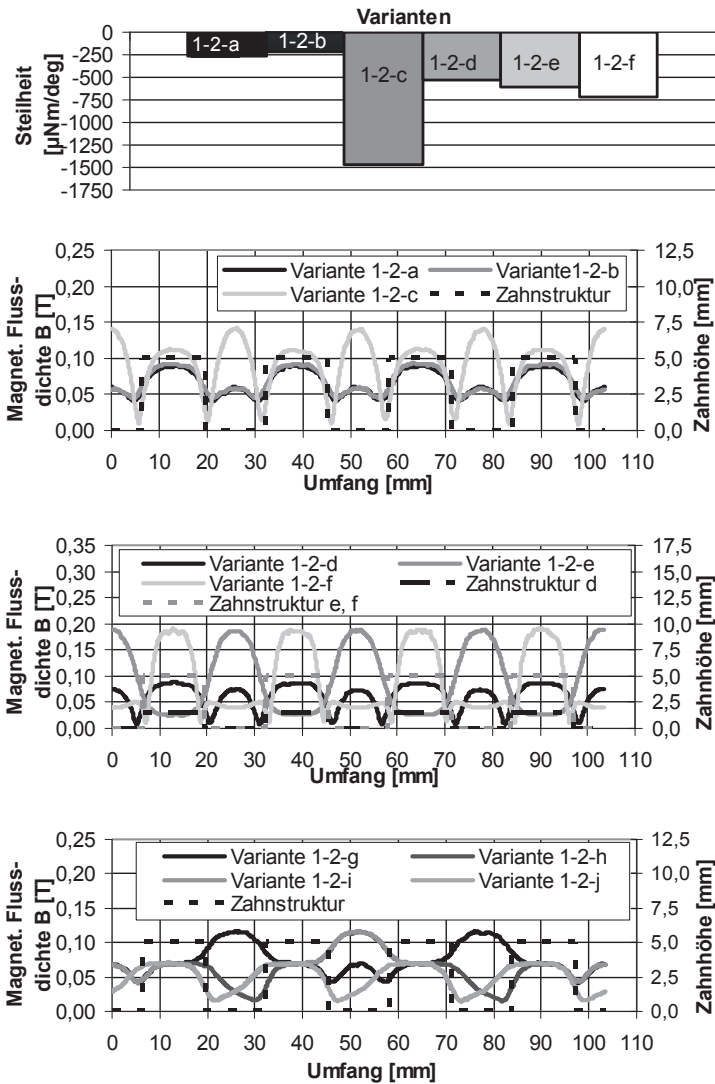


Bild 8.4.3.2 Vergleich der Varianten 1-2-a bis 1-2-j hinsichtlich Steilheit der Drehmoment-Kennlinie und dem Verlauf der magnetischen Flussdichte

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Der Vergleich von Aufbau 1-2-d und 1-2-c zeigt, dass die Verringerung der Zahnhöhe die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie drastisch verringert. Der Zusammenhang ist bereits aus Kapitel 8.4.2 bekannt. Dieser Effekt wird durch die, bei diesem Lagerungsprinzip, zusätzliche permanentmagnetische Erregung verstärkt.

Weiterhin ist es möglich die Dauermagnete nicht in den Lücken (1-2-c) sondern auf den Zähnen (1-2-f) anzubringen. Durch die Anbringung der Permanentmagnete auf den Zähnen, ist es notwendig die Zähne in der Höhe stark zu verkleinern, ansonsten wäre der Abstand zwischen Halte- und Schwebemagnet so groß, dass das Kraftniveau der Kraft-Hub-Kennlinie des Magnetlagers stark absinkt. Bei diesem Aufbau verläuft der größte Flussverlauf über die Zähne und besitzt eine geringere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie im Vergleich zu Variante 1-2-c.

Aufbau 1-2-g weist einen Flussverlauf vor allem über die Lücken auf. Das Drehmoment ist im Arbeitspunkt (0 deg Verdrehung des Schwebemagneten) ungleich Null und damit ist, nach Kriterium 3 (Kapitel 8.1) diese Lagervariante für den Einsatz als stabiles rotationsfreies Magnetlager in einer Magnetschwebewaage nicht geeignet und die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie ist somit in Bild 8.4.3.2 a) nicht angegeben.

Die Varianten 1-2-h, 1-2-i und 1-2-j zeigen – durch die teilweise Magnetisierung der Permanentmagnete in axialer Richtung – bei 0 deg Verdrehung des Schwebemagneten ein Drehmoment ungleich Null. Somit sind, nach Kriterium 3 (Kapitel 8.1) diese drei Lageraufbauten für die rotationsfreie Lagerung in einer Magnetschwebewaage nicht geeignet. Deshalb ist die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie dieser drei Lagervarianten in Bild 8.4.3.2 a) nicht enthalten.

Die Gegenüberstellung aller Lagervarianten aus Bild 8.4.3.1 zeigt, dass mit ca. $-1500 \mu\text{Nm/deg}$ der Aufbau 1-2-c die größte Steilheit der Drehmoment-Kennlinie aufweist. Damit liegt der Wert um circa das 15fache über dem geforderten Wert von $-92 \mu\text{Nm/deg}$ nach Kriterium 2 (s. Kapitel 8.1) und ist damit überdimensioniert.

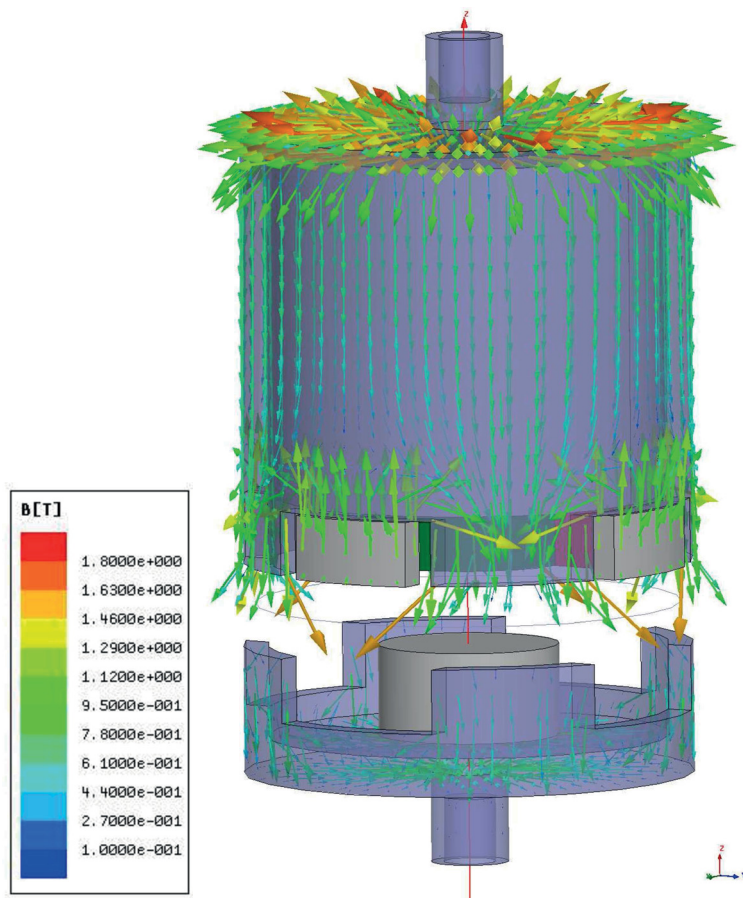


Bild 8.4.3.3 Magnetische Flussdichte des Magnetlagers nach dem Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung mit vier Zähnen, einer Zahnhöhe von 5mm, einem Flächenfaktor von 1 und vier Dauermagnete im Haltemagneten in Vektordarstellung nach Variante 1-2-a

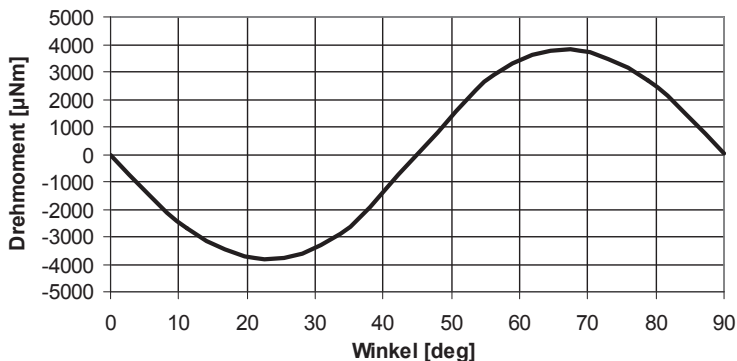


Bild 8.4.3.4 Drehmoment über Verdrehwinkel für das Magnetlager nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnstruktur und zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung mit vier Zähnen, einer Zahnhöhe von 5 mm, einem Flächenfaktor von 1 und vier Dauermagnete im Haltemagneten nach Variante 1-2-a

Die Varianten 1-2-a bis 1-2-f erfüllen alle die Anforderung nach einem ausreichenden Rastmoment nach Kriterium 1 (Kapitel 8.1) und einer ausreichenden Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nach Kriterium 2 (Kapitel 8.1). Bei den Aufbauten 1-2-a, 1-2-b und 1-2-f verläuft der Flussverlauf vor allem über die Zähne und weniger über die Lücken. Dadurch wird die Formänderung des Gehäuses gezielt ausgenutzt.

In den Varianten 1-2-c und 1-2-f ist die doppelte Anzahl von Permanentmagneten angebracht, als bei den Varianten 1-2-a und 1-2-b. Dadurch sind, im Vergleich zu den Varianten 1-2-a und 1-2-b, die Kosten und das Gewicht für das Magnetlager erhöht. Durch das zusätzliche Gewicht wird die Messgenauigkeit der eingesetzten Präzisionswaage verringert (Kapitel 6.5). Daher sind die Varianten 1-2-a und 1-2-b zu bevorzugen. Da sich alle Varianten nur durch den Austausch der Permanentmagnete sehr leicht aufbauen lassen, werden die drei Varianten 1-2-a, 1-2-c und 1-2-f aufgebaut und auf Funktionalität getestet.

Zur Veranschaulichung des Flussverlaufs ist für die Variante 1-2-a in Bild 8.4.3.3 die magnetische Flussdichte in Vektordarstellung angegeben und Bild 8.4.3.4 zeigt die Drehmoment-Kennlinie.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Die Lagervariante nach dem Prinzip der Formänderung und zusätzlicher Erregung benötigt keine zusätzliche Regelung. Daher genügt die Verwendung des PID-Reglers der rotationssymmetrischen Lagervariante aus Kapitel 7.

8.4.4. Prinzip: Rastierung mit und ohne zusätzliche Erregung

Das Prinzip der Rastierung kann ebenfalls für die Gestaltung eines rotationsfreien Lagers verwendet werden. Diese Variante nutzt die Reluktanzkraft und wird in ähnlicher Weise auch bei Schrittmotoren eingesetzt [33], [42], [46]. Ein schematischer Aufbau ist in Bild 8.2.1 zu sehen und besteht aus einem Rotor mit verschiedenen vielen Zähnen bzw. Polen sowie einer Anordnung von mehreren Spulen. Dabei befindet sich der Rotor in der Magnetschwebewaage am Gestänge zwischen Schwebemagnet und Probe und die Spulenanordnung außerhalb der Messzelle. Es gibt unzählige Kombinationsmöglichkeiten von Rotorform und Spulenanordnung.

Zur Auslegung kann ein planares FEM-Modell verwendet werden. Damit ist im Folgenden zu klären, welche Kombination von Spulenanordnung und Anzahl der Rotorzähne bzw. -pole geeignet ist, um die notwendigen Anforderungen (Kapitel 8.1) zu erfüllen. Dazu wird für alle berechneten Varianten ein definierter Abstand zwischen Rotor und Spulenanordnung eingehalten und zur Vergleichbarkeit stehen für jede Spule eine Durchflutung von 1000 AW zur Verfügung.

Die erste Variante zur Darstellung des Prinzips der Rastierung ist in Bild 8.4.4.1 dargestellt. Mit drei um jeweils 120° versetzte Spulen und einem Rotor der jeweils aus einem oder zwei Permanentmagneten (2-2-a-1 und 2-2-a-2) bzw. aus Stahl (2-1-a) besteht, kann – bei Bestromung von jeweils einer Spule (Spule 1) – der Rotor in einer Position gehalten und bei Bestromung einer anderen Spule (Spule 2 oder 3) definiert um 120° gedreht werden (Kriterium 5, Kapitel 8.1). Die Varianten 2-2-a-1 und 2-2-a-2 unterscheiden sich im Aufbau des Rotors. Aufbau 2-2-a-1 besteht aus zwei Magneten mit gleicher und 2-2-a-2 aus zwei Magneten unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung.

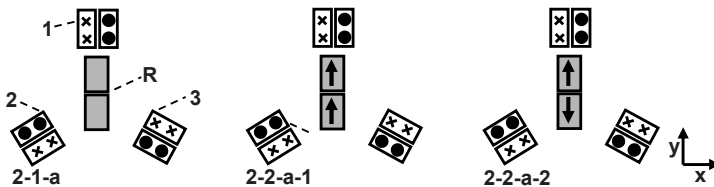


Bild 8.4.4.1 Lagervarianten nach dem Prinzip der Rastierung bestehend aus drei Spulen (1, 2 und 3) jeweils um 120° versetzt und jeweils einem Rotor (R) aus Stahl (2-1-a) oder aus permanentmagnetischen Material (2-2-a-1 und 2-2-a-2)

Die Berechnung ergibt eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von ca. $-930 \mu\text{Nm/deg}$ für Variante 2-2-a-1, ca. $-860 \mu\text{Nm/deg}$ für Variante 2-2-a-2 und $-13 \mu\text{Nm/deg}$ für Variante 2-1-a wenn nur Spule 1 bestromt ist. Damit wird deutlich, dass der Aufbau mit Stahlrotor das Anforderungskriterium 2 (Kapitel 8.1) hinsichtlich ausreichender Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nicht erfüllt. Daneben sind die wirkenden Querkräfte F_x und F_y auf den Rotor zu berücksichtigen, die nach Kriterium 4 (Kapitel 8.1) $F_x = F_y = 0 \text{ N}$ betragen sollen. Dieses Kriterium wird durch keine der drei Varianten (2-1-a, 2-2-a-1 und 2-2-a-2) erfüllt. Dabei belaufen sich die Kräfte F_y in y-Richtung auf ca. 850 mN (2-2-a-1), 660 mN (2-2-a-2) und 30 mN für 2-1-a ebenfalls bei alleiniger Bestromung von Spule 1. Somit wird deutlich, dass durch den Stahlrotor, im Vergleich zu einem Rotor aus permanentmagnetischen Material, die Querkräfte und somit die Verfälschung auf das Messsignal kleiner sind, allerdings die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nicht ausreichend hoch ist (Kriterium 2, Kapitel 8.1). Mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung in Variante 2-2-a-1 und 2-2-a-2 ist die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie (Kriterium 2) ausreichend, aber die Querkräfte sind nicht tolerierbar (Kriterium 4).

Daher sollen im nächsten Aufbau nach Bild 8.4.4.2 die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erhöht und die Querkraft in y-Richtung reduziert werden. Dazu wird der Rotor aus obigem Aufbau mit nur zwei Spulen kombiniert. Nachteil dieser Variante ist, dass sich der Rotor nicht aktiv in der y-Achse positionieren lässt (Kriterium 5, Kapitel 8.1).

Es fällt auf, dass die Spule 2 bei Variante 2-2-b-2 im Vergleich zu Variante 2-2-b-1 umgekehrt bestromt wird. Durch die umgekehrte Bestromung lässt sich bei Variante 2-2-b-2 ein höheres Rastmoment und eine größere Steilheit der Drehmoment-Kennlinie

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

realisieren. Bild 8.4.4.3 zeigt zur Veranschaulichung den Flussverlauf der Variante 2-1-b jeweils mit Stahlrotor einmal mit Polung der Spulen nach Bild 8.4.4.2 und einmal mit umgekehrter Polung von Spule 2. Anhand des Flussverlauf wird deutlich, wie sich die Polung der Spulen auf die wirkenden Kräfte bzw. Momente auswirkt. Es werden somit die beteiligten Spulen immer so bestromt, dass maximale Werte für Rastmoment und Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erreichbar sind.

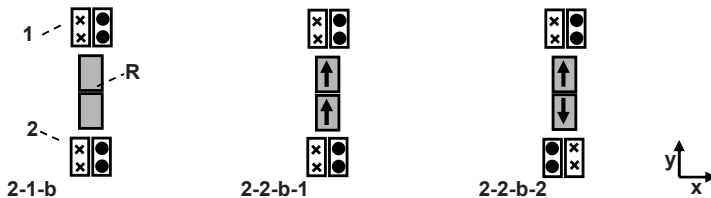


Bild 8.4.4.2 Lagervarianten nach dem Prinzip der Rastierung bestehend aus zwei Spulen (1, 2) jeweils um 180 ° versetzt und jeweils einem Rotor (R) aus einem Stahlrotor (2-1-b) oder aus permanentmagnetischen Material (2-2-b-1; 2-2-b-2)

Aus der Berechnung ergeben sich Steilheiten der Drehmoment-Kennlinie von ca. $-1790 \mu\text{Nm/deg}$ (2-2-b-1), $-1930 \mu\text{Nm/deg}$ (2-2-b-2) bzw. $-42 \mu\text{Nm/deg}$ (2-1-b). Bei den Lagervarianten 2-1-b, 2-2-b-1 und 2-2-b-2 (Bild 8.4.4.2) herrschen keine Querkräfte in y-Richtung. Die Querkräfte, bei Verschiebung des Rotors um 0,1 mm in der y-Achse, belaufen sich auf $F_y' = 30 \text{ mN}$ (2-2-b-1), 20 mN (2-2-b-2) und 4 mN (2-1-b) und bei Verschiebung um 0,1 mm in der x-Achse betragen die Kräfte $F_x' = -63 \text{ mN}$ (2-2-b-1), -32 mN (2-2-b-2) und -1 mN (2-1-b). Die Querkräfte (Kriterium 4, Kapitel 8.1) des Lageraufbaus mit Stahlrotor (2-1-b) sind, im Vergleich zum Rotor aus permanentmagnetischen Material (2-2-b-1 und 2-2-b-2), deutlich verringert, allerdings ist die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie der Variante mit Stahlrotor (2-1-b) nicht ausreichend nach Kriterium 2 (Kapitel 8.1).

Damit die Anforderungen an eine ausreichende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie und reduzierte Querkräfte (Kriterium 2 und 4, Kapitel 8.1) erfüllt werden, ist der Aufbau des Lagers mit Stahlrotor so zu erweitern, dass der Rotor aus drei bzw. vier Zähnen und jeweils drei oder vier Spulen besteht. Bild 8.4.4.4 zeigt dazu beide Aufbauten jeweils für einen Stahlrotor.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

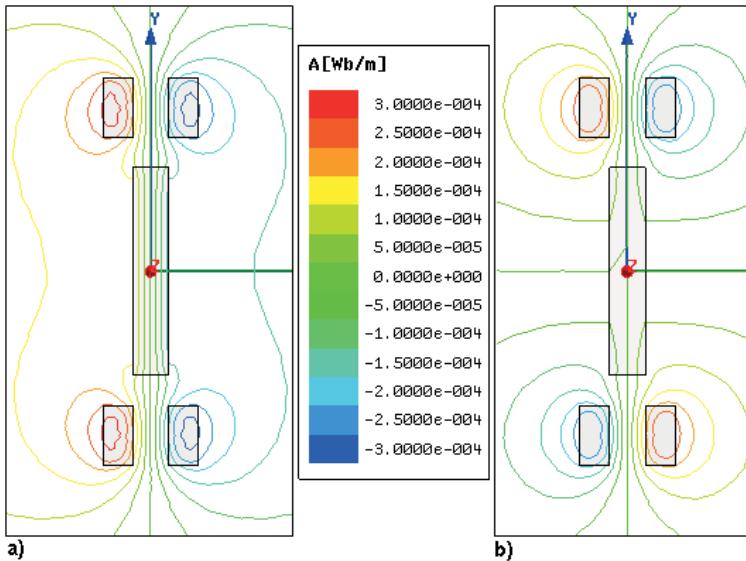


Bild 8.4.4.3 a) Magnetfeldlinien der Lagervariante 2-1-b mit Stahlrotor und b) Flussverlauf bei umgepolter Spule 2

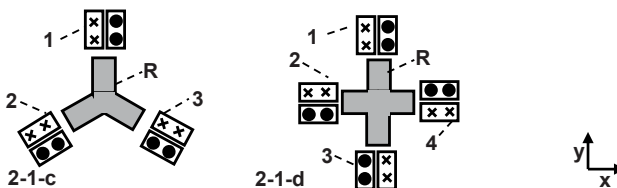


Bild 8.4.4.4 Lagervarianten nach dem Prinzip der Rastierung bestehend aus drei Spulen (Aufbau 2-1-c) und vier Spulen (Aufbau 2-1-d) mit einem Stahlrotor (R)

Für die Realisierung der zusätzlichen aktiven Positionierbarkeit nach Kriterium 5 (Kapitel 8.1), d.h. der Rotor wird durch entsprechende Bestromung gezielt in der z-Achse gedreht, sind Aufbauten mit einer größeren Zahn- als Spulenanzahl denkbar. Zudem kann die Spulenordnung auf einem Rückschlussgehäuse aus Stahl platziert werden (Variante 2-1-e in Bild 8.4.4.5). Dadurch werden das Rastmoment und die

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Steilheit der Drehmoment-Kennlinie erhöht. Allerdings sind dann auch die auftretenden Querkräfte verstärkt. Für einen Aufbau nach Variante 2-1-e ergeben sich eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von ca. $-1520 \mu\text{Nm/deg}$ und Querkräfte bei Verschiebung in y-Richtung um 0,1 mm von $F_y' = 0,14 \text{ N}$ und bei einem außermittigen Versatz um 0,1 mm in x-Richtung eine Kraft von $F_x' = -0,05 \text{ N}$.

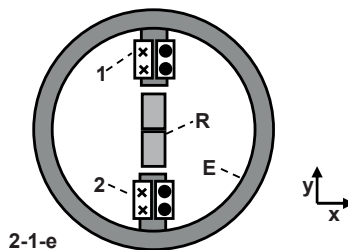


Bild 8.4.4.5 Lagervariante 2-1-e nach dem Prinzip der Rastierung bestehend aus zwei Spulen (1, 2), einem Rotor aus Stahl (R) und einem Rückschlussgehäuse aus Stahl (E)

Um eine Übersicht zu erhalten, welche Rastmomente und Steilheiten der Drehmoment-Kennlinie mit dem Prinzip zur Rastierung erreichbar sind, sollen im Folgenden sinnvolle Varianten für den Einsatz in der Magnetschwebewaage definiert werden (s. Bild 8.4.4.6). Diese Varianten werden jeweils mit und ohne Eisenrückschluss berechnet, sowie mit einem Rotor aus Stahl oder einem permanentmagnetischen Material. Weiterhin wird auch die Magnetisierungsrichtung der Permanentmagnete variiert.

Dabei ist bei den Varianten 2-1-f, 2-2-f-1, 2-2-f-2, 2-1-i, 2-2-i-1 und 2-2-i-2 zum Halten des Rotors in der eingezeichneten Position jeweils nur Spule 1 und Spule 3 bestromt, wohingegen bei den anderen Varianten dazu alle gezeichneten Spulen bestromt werden.

Mit den angegebenen Varianten können maximal -32 mNm Rastmoment und $-2,9 \text{ mNm/deg}$ Steilheit der Drehmoment-Kennlinie ohne Rückschlussgehäuse erzeugt werden. Damit ergeben sich minimal $F_y' 3,2 \text{ mN}$ und $F_x' 0,7 \text{ mN}$ an Querkraft bei Rotorversatz in x-Richtung bzw. y-Richtung um 0,1 mm. Für ein zusätzliches Rückschlussgehäuse wird ein deutlich höheres Rastmoment von -131 mNm und eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von -50 mNm/deg erreicht. Durch das zusätzliche

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Eisenrückschlussgehäuse verstärken sich auch die Querkräfte auf minimal 85 mN (F_y') und -20 mN (F_x').

Die angegebenen Werte für die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie und das Rastmoment lassen sich, je nach Kombination von Anzahl der Spulen und Rotorzähne, weiter erhöhen.

Zusammenfassend können folgende Punkte festgehalten werden: Mit dem Prinzip der Rastierung kann der Rotor und damit die gesamte schwebende Baugruppe in der y-Achse rotationsfrei positioniert werden. Je nach Verhältnis zwischen Spulenanzahl des Stators und Zahnanzahl des Rotors, kann dieser aktiv in der y-Achse gedreht werden. Mit einer zusätzlichen permanentmagnetischen Erregung – Rotor besteht aus permanentmagnetischen Material – lassen sich ein ausreichendes Rastmoment (Kriterium 1, Kapitel 8.1) und eine genügende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von mindestens -92 $\mu\text{Nm/deg}$ (Kriterium 2, Kapitel 8.1) erzeugen. In diesem Fall ergeben sich jedoch nach Kriterium 4 (Kapitel 8.1) unzulässige Querkräfte, auf den aus der Rotationsachse versetzten Rotor, die das thermogravimetrische Messsignal einer Magnetschwebewaage verfälschen würden. Eine Rotorausführung aus Stahl ergibt geringere Querkräfte, dafür auch wesentlich geringere Rastmomente und Steilheit der Drehmoment-Kennlinien. Die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie kann nur mit einem Rückschlussgehäuse für die Spulen erhöht werden. Jedoch verstärken sich damit – im Fall des aus der Rotationsachse versetzten Rotors – auch die Querkräfte auf den Rotor.

Zusätzlich wird eine sehr aufwendige Anordnung von Spulen benötigt. Dies macht die Realisierung in der Magnetschwebewaage kompliziert, da der geeignete Bauraum und geeignete Wandstärken und Materialien der Messzellenwand vorhanden sein müssen. Für die Ansteuerung eines Lagers nach dem Prinzip der Rastierung muss eine zusätzliche Elektronik vorgesehen werden. Diese muss das Ansteuern von den einzelnen Spulen ermöglichen (Kriterium 6).

Aus den genannten Gründen ist das Prinzip der Rastierung zur rotationsfreien Lagerung in einer Magnetschwebewaage ungeeignet und es ist kein Aufbau und Test eines Funktionsmusters geplant.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

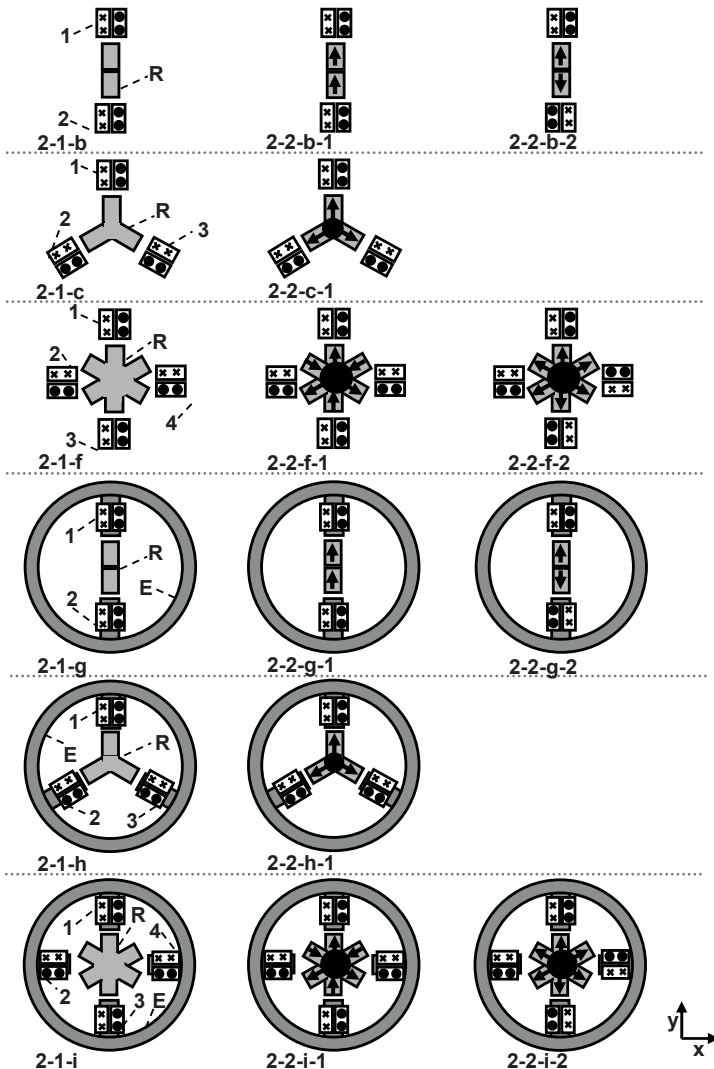


Bild 8.4.4.6 Übersicht der berechneten Varianten nach dem Prinzip der Rastierung mit jeweils verschieden vielen Spulen (1, 2, 3, 4) und einem Rotor (R) aus Stahl oder permanentmagnetischen Material unterschiedlicher Magnetisierungsrichtung (Pfeil) ohne und mit Rückschlussgehäuse aus Stahl (E)

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

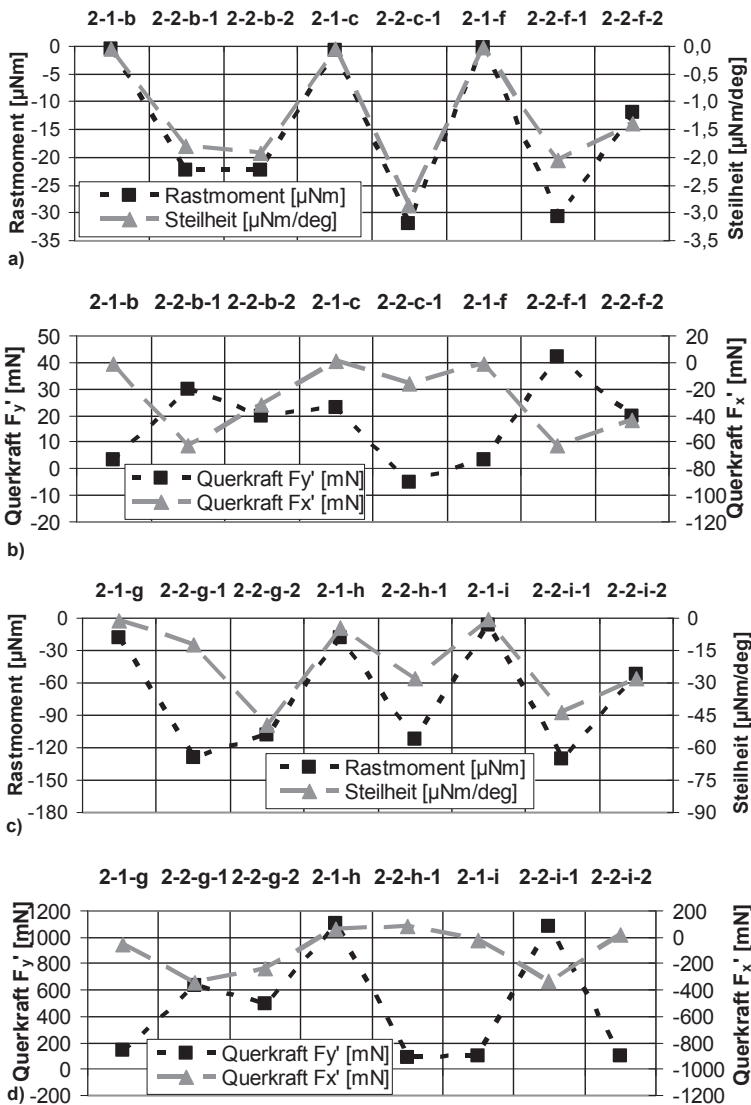


Bild 8.4.4.7 Ergebnisse aus der Berechnung der Lagervarianten nach dem Prinzip der Rastierung, a) und b) ohne Rückschlussgehäuse, c) und d) mit Rückschlussgehäuse

8.4.5. Prinzip: Drehfeld mit und ohne zusätzliche Erregung

Neben den bereits besprochenen Möglichkeiten kann ein Drehfeld zur stabilen Lagerung und Positionierung nach den Anforderungen aus Kapitel 8.1 genutzt werden [47], [48]. Bild 8.2.2 zeigt den Aufbau eines solchen Lagers. Dieses Lager besteht aus einem Rotor (Stahl oder Dauermagnet) und Stator aus Spulenordnung und Gehäuse (Stahl oder Kunststoff). Sowohl die zusätzliche Erregung durch den Permanentmagneten als auch das Rückschlussgehäuse (Stahlgehäuse) verstärken die auftretenden Momente und Querkräfte. Der Rotor lässt sich mit diesem Prinzip in jede beliebige Position aktiv drehen und kann dort gehalten werden.

Für die Berechnung wird, wie für die Auslegung des Prinzips der Rastierung in Kapitel 8.4.4, ebenfalls ein planares FEM-Modell verwendet. Zur Vergleichbarkeit der einzelnen Varianten wird auch hier mit einer Durchflutung von 1000 AW je Spule gerechnet.

Aus Kapitel 8.4.4 ist bekannt, dass die Querkräfte mit einem Stahlrotor, im Gegensatz zu einem Rotor aus permanentmagnetischen Material deutlich geringer sind. Daher wird die Berechnung des Drehfeldes nach Bild 8.2.2 mit Stahlrotor vorgenommen (Variante 3-1-a). Das stabile Halten des Rotors findet mit einer alleinigen Bestromung von Spule 1 statt. Daher wird nicht um 120° phasenverschoben, sondern mit Gleichstrom jeweils nur eine Spule bestromt. Daher ist das FEM-Modell vereinfacht darstellbar (siehe dazu auch das FEM-Modell in Bild 8.4.5.1). Daraus ergibt sich eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von ca. $-8 \mu\text{Nm/deg}$ und Querkräften von $F_y = 2,9 \text{ N}$ und $F_x = -0,06 \text{ mN}$ jeweils für den Versatz des Rotors um 0,1 mm in y- und x-Richtung.

Durch die Nutzung eines Rückschlussgehäuses für die Spulenordnung aus Stahl (Variante 3-1-b) erhöht sich die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie auf ca. $-160 \mu\text{Nm/deg}$ und die Querkräfte bei Rotorversatz auf $F_y = 0,7 \text{ N}$ und $F_x = -3,6 \text{ mN}$. Da diese Querkräfte nach Kriterium 4 (Kapitel 8.1) für die rotationsfreie Lagerung in einer Magnetschwebewaage zu hoch sind, wird im Folgenden das Prinzip des Drehfeldes mit Stahlrotor ohne Rückschlussgehäuse aufgebaut, wodurch geringere Querkräfte entstehen.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Die sehr präzise aktive Positionierbarkeit nach Kriterium 5 (Kapitel 8.1) dieses Lagerprinzips ist gegenüber den anderen Lagervarianten eine Besonderheit. Sofern die Messung gute Ergebnisse – hinsichtlich ausreichenden Rastmoment nach Kriterium 1 und Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nach Kriterium 2 – liefert, können die Querkkräfte durch entsprechende Abstandssensoren (zwischen Rotor und Spulenordnung) und einer überlagerten Regelung reduziert werden. Eine zu geringe Steilheit der Drehmoment-Kennlinie ist mit vergrößerten Rotorabmessungen auszugleichen. Daher zeigt Bild 8.4.5.1 den Flussverlauf für diese Lagervariante bei Bestromung von Spule 1 nach Nummerierung aus Bild 8.2.2. Der Fluss verläuft über den Rotor und dieser wird somit in der Position gehalten.

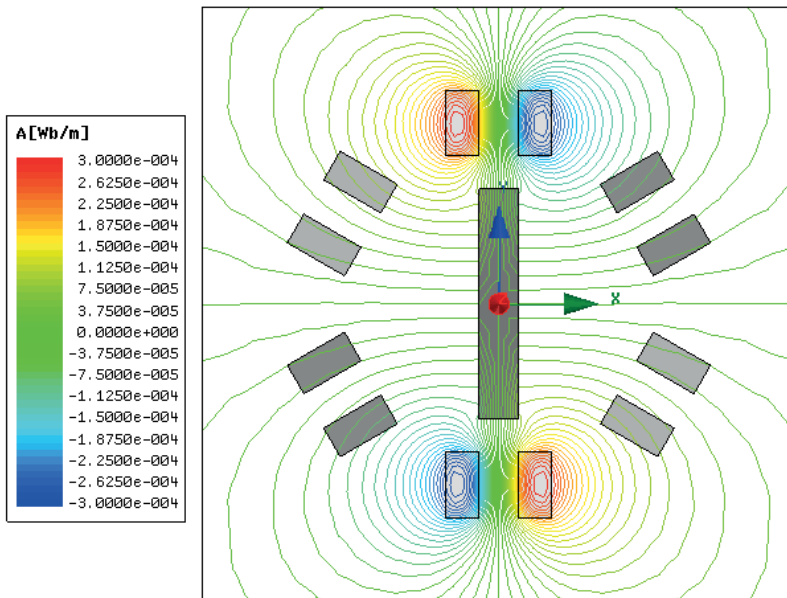


Bild 8.4.5.1 Magnetfeldlinien der Lagervariante (3-1-a) nach dem Prinzip Drehfeld bei Bestromung von nur einer Spule und einem Stahlrotor

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

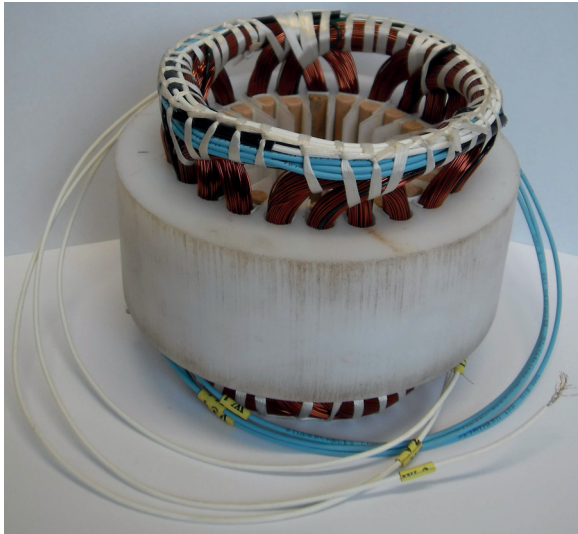


Bild 8.4.5.2 Spulenordnung nach dem Prinzip des Drehfeldes

Wie oben erwähnt, wird für das stabile Halten des Rotors in einer Position, ein Gleichstromanschluss nur an einer Spule benötigt (Bild 8.2.2). Dafür ist kein zusätzlicher Regler notwendig (Kriterium 5, Kapitel 8.1).

Für das gezielte Drehen hingegen ist die Bestromung der drei Spulen jeweils Phasenverschoben um 120° zu realisieren. Sofern dieses Lagerungsprinzip in der Magnetschwebewaage genutzt werden soll, muss eine aufwendige Regelung für das aktive Drehen in der y-Achse entwickelt werden. Da für die Funktionsprüfung ein Gleichstromanschluss ausreichend ist, wird auf die Entwicklung des Reglers zum gezielten Drehen an dieser Stelle nicht eingegangen.

Die gefertigte Spulenwicklung (ohne Rotor) nach dem beschriebenen Prinzip des Drehfeldes ist in Bild 8.4.5.2 dargestellt. Die zugehörige schematische Zeichnung findet sich in Bild 8.2.2.

8.4.6. Gegenüberstellung der berechneten Varianten

Tabelle 8.2.1 enthält die verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung einer rotationsfreien Lagerung in einer Magnetschwebewaage. Die verschiedenen Varianten werden in den Kapiteln 8.4.1 bis 8.4.5 detailliert berechnet. Im Folgenden findet die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus der Berechnung der einzelnen Lagervarianten in Tabelle 8.4.6.1 statt. Diese Tabelle nennt die einzelnen Variationsparameter für das jeweilige Lagerungsprinzip (z.B. Zahnhöhe, Zahnanzahl und Zahnfläche für das Prinzip der Formänderung) und die damit maximal erreichbaren Werte aus der Berechnung für Kriterium 1 (ausreichendes Rastmoment $> 92 \mu\text{Nm}$) und Kriterium 2 (ausreichende Steilheit im Arbeitspunkt $> 92 \mu\text{Nm/deg}$). Weiterhin entstehen bei den Prinzipien der Rastierung und des Drehfelds Querkräfte nach Kriterium 4 (Kapitel 8.1) auf den Rotor, wenn dieser aus der Rotationsachse in y- (F_y') bzw. x- Richtung (F_x') versetzt ist. Diese werden jeweils für einen Versatz von 0,1 mm angegeben. Außerdem werden die einzelnen Lagervarianten auch hinsichtlich der anderen Auswahlkriterien aus Kapitel 8.1 bewertet. Dabei beziehen sich alle Werte auf sinnvolle Größenordnung bezüglich der Herstellung (z.B. Zahnanzahl für das Prinzip der Formänderung und Spulenanzahl für das Prinzip der Rastierung).

Variante 1-1-a besteht aus einem quadratischen Gehäuse von Halte- und Schwebemagnet und nutzt damit das Prinzip der Formänderung. Dieses Lager erfüllt zwar das Kriterium 2 nicht, soll aber dennoch aufgebaut werden, da dies dem Lagerungsprinzip für die Dichtemessung in der Magnetschwebewaage entspricht (s. Kapitel 6.2). Somit dient diese Variante zur Vergleichbarkeit mit den anderen Prinzipien und es kann die erzielte Optimierung durch die Entwicklung im Rahmen der vorliegenden Arbeit herausgestellt werden.

Auch Variante 1-1-b nutzt das Prinzip der Formänderung und erfüllt – trotz optimaler Abstimmung aller Parameter (Zahnanzahl, Zahnhöhe, Zahnfläche) nicht alle Anforderungskriterien. Dennoch soll auch dieses Lager aufgebaut werden um mit der Funktionsprüfung die Berechnungsergebnisse zu bestätigen.

Außerdem ist die Zahngeometrie so gewählt, dass – durch die Anbringung von zusätzlichen Permanentmagneten – auf das Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

permanentmagnetischer Erregung erweitert werden kann. Durch detaillierte Betrachtung dieses Lagerungsprinzip in Kapitel 8.4.3 haben sich die Varianten 1-2-a, 1-2-c und 1-2-f als geeignet erwiesen. Bild 8.4.3.1 zeigt die genaue Anordnung der Dauermagnete. Mit diesen Varianten können Rastmomente von bis zu -20 mNm und Steilheiten bis zu -1500 $\mu\text{Nm/deg}$ erzeugt werden.

Als zweites Prinzip in Tabelle 8.2.1 ist die Rastierung zu finden. Hier kann die Anzahl der Zähne und der Statorspulen variiert werden. Daneben ist es möglich mit und ohne zusätzliche permanentmagnetische Erregung bzw. mit und ohne Rückschlussgehäuse zu arbeiten. Generell ergeben sich mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung im Rotor größere Steilheiten der Drehmoment-Kennlinie und Rastmomente als ohne zusätzliche Erregung (Rotor aus Stahl). Jedoch steigen damit auch die Querkräfte auf den außermittig zur Rotationsachse befindlichen Rotor. Gleiches gilt für die Einbindung eines Rückschlussgehäuses aus Stahl. Zudem kann der Rotor nur bei speziellen Kombinationen von Rotorform und Spulenzahl aktiv positioniert werden. Dazu müssen einerseits mehr Rotorzähne als Spulen vorhanden sein und andererseits beide so platziert werden, dass bei einem zentrisch angebrachten Rotor keine Querkräfte entstehen. Gegenüber dem Prinzip der Formänderung, ist der einzige Vorteil der Rastierung, die Möglichkeit zur aktiven Positionierbarkeit des Rotors. Da diese nur mit großem Aufwand (erhöhter Bedarf an Bauraum und großer konstruktiver Aufwand) realisierbar ist und zudem in der Praxis immer Querkräfte auf den Rotor auftreten werden, ist es nicht angedacht diese Variante in einem Funktionsmuster aufzubauen und zu prüfen. Die Werte aus der Berechnung der Varianten in Bild 8.4.4.6 mit dem Prinzip der Rastierung (aus Kapitel 8.4.4) sind in Tabelle 8.4.6.1 eingetragen. Die angegebenen Werte für die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie und das Rastmoment lassen sich je nach Kombination von Anzahl der Spulen und Rotorzähne weiter erhöhen.

Das zuletzt betrachtete Prinzip 3 (Drehfeld) kann den Rotor in jeder beliebigen Stellung platzieren. Jedoch ist in Bezug auf die vorhandenen Querkräfte die gleiche Problematik vorhanden wie beim Prinzip der Rastierung. Um die Querkräfte möglichst gering zu halten, wird dieses Lagerprinzip nur mit Stahlrotor und ohne Rückschlussgehäuse betrachtet. Allerdings ergeben sich damit sehr geringe Rastmomente und Steilheiten

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

der Drehmoment-Kennlinie. Diese erhöhen sich durch eine Vergrößerung der Rotorabmessungen. Aufgrund der Besonderheit dieses Prinzips, den Rotor in jede gewünschte Position drehen zu können, soll trotz der auftretenden Querkräfte ein Funktionsmuster aufgebaut und geprüft werden. Falls mit Erhöhung der Rotorabmessungen die Anforderungen der Kriterien 1 und 2 (Kapitel 8.1) erfüllt werden können, muss im Weiteren die Minimierung der Querkräfte durchgeführt werden. Dies kann durch zusätzliche Lagesensoren zwischen Rotor und Stator und einer dazugehörigen Regelung realisiert werden. Dies würde dem Prinzip Aktives Lager mit Drehfeld (Tabelle 8.2.1) entsprechen. Zur Prüfung von Variante 3-1 reicht eine Bestromung von jeweils einer Spule mit Gleichstrom aus, um das stabile Halten zu prüfen. Erst die gezielte Drehung in beliebige Stellungen in der y-Achse benötigt eine zusätzliche Regelung.

Aus dem Vergleich der Berechnungsergebnisse in Tabelle 8.4.6.1 wird deutlich, dass die Variante 1-2, nach dem Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung, am besten geeignet ist für die Anwendung in einer Magnetschwebewaage mit den bekannten Anforderungen (Kapitel 8.1). In den nächsten Kapiteln folgt die Prüfung der Funktionsmuster am Versuchsstand.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 8.4.6.1 Vergleich der Berechnungsergebnisse der verschiedenen Möglichkeiten zur Realisierung einer rotationsfreien Lagerung in der Magnetschwebewaage

| Prinzip | Formänderung | | | Rastierung | | | Drehfeld | |
|--|--|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1-1-a | 1-1-b | 1-2-a bis 1-2-j | 2-1-a bis 2-1-j | 2-2-a bis 2-2-j | 2-2-i | 3-1-a | 3-2-a |
| Variante | | | | | | | | |
| Ausführung | eckig | Zähne | Zähne | Zähne | permanent-magnetisch | Rotor: X Zähne Y Statorspulen | 2-Zahn Rotor 3 Stator Spulen | permanent-magnetisch |
| zusätzliche Erregung | ohne | ohne | permanent-magnetisch | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | ohne | permanent-magnetisch | ohne | permanent-magnetisch |
| Variationsparameter | Kantenlänge l | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F | Anzahl Zähne Zahnhöhe h Flächenfaktor F |
| | | | | | | | | |
| Kriterien | Kriterium 1: M_{\max} [µNm] $M_{\text{Soll}} > 92 \mu\text{Nm}$ | -250 | bis -800 | bis -20000 | bis -700 bis -18000 (E) | bis -32000 bis -13100 (E) | bis -2050 bis -3500 (E) | bis -22000 bis -54000 (E) |
| | | | | | | | | |
| Kriterium 2: dM/da [µNm/deg] dM/da > 92 µNm/deg | -19 | bis -50 | bis -1500 | beliebig erweiterbar | beliebig erweiterbar | beliebig erweiterbar | beliebig erweiterbar | beliebig erweiterbar |
| | | | | | | | | |
| Kriterium 3 | | | | | | | | |
| dM/da < 0; ΣM = 0 | | | | | | | | |
| Kriterium 4: | F_x, F_y [mN] | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $F_x = F_y = 0 \text{ N}$ | | | | | $F_y: -5; F_x: -16$ | $F_y: -5; F_x: -16$ | $F_y: 3; F_x: 0,1$ | $F_y: 57; F_x: -60$ |
| $F_x' = F_y' = 0 \text{ N}$ | | | | | $F_y: 97 \text{ (E)}$ | $F_y: 85 \text{ (E)}$ | $F_y: 76 \text{ (E)}$ | $F_y: 27000 \text{ (E)}$ |
| Minimal Werte | | 0 | 0 | 0 | $F_x: -19 \text{ (E)}$ | $F_x: 23 \text{ (E)}$ | $F_x: -4 \text{ (E)}$ | $F_x: -126 \text{ (E)}$ |
| Kriterium 5 | | | | | | | | |
| Aktiv positionierbar? | | | nicht erfüllt | | teilweise | | erfüllt | |
| Kriterium 6 | | | | | | | | |
| zusätzliche Regelung? | | | nicht notwendig | | notwendig | | kompliziert | |
| Kriterium 7 | | | | | | | | |
| Konstruktion / Kosten | | | | | | | | |

s. Tabelle 8.2.1

8.5. Prüfung der Funktionsmuster zur rotationsfreien Lagerung

Wie die vorhergehenden Kapitel zeigen, gibt es verschiedene Prinzipien zur Entwicklung eines rotationsfreien Lagers, die wiederum durch die Veränderung von Gestaltungsparametern in zahllosen Untervarianten aufgebaut werden können. Aufgrund der Berechnung und der Gegenüberstellung der Ergebnisse haben sich einige für die rotationsfreie Lagerung in einer Magnetschwebewaage geeignete Varianten ergeben, die im Folgenden auf Funktionalität geprüft werden sollen. Tabelle 8.5.1 enthält eine Übersicht aller zu prüfenden Varianten. Die Tabelle enthält neben den gewählten Parametern, das zugehörige berechnete Rastmoment und die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie, sowie die auf den Rotor wirkenden Querkräfte bei einem Versatz von 0,1 mm jeweils in x- (F_x') bzw. y- Richtung (F_y'). Ein Lager nach dem Prinzip der Rastierung wird, aufgrund der oben detailliert beschriebenen Nachteile (wirkende Querkräfte auf den aus der Rotationsachse versetzten Rotor, komplizierter Rotor- und Spulenaufbau) nicht als Funktionsmuster aufgebaut und geprüft.

In Kapitel 6.6 werden die Messmethoden für die Prüfung der einzelnen Lagervarianten beschrieben. Darin ist die direkte Bestimmung des Rastmoments (Federwaage), die indirekte Bestimmung der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie sowie des Rastmoments mittels Aufzeichnung des Rotationsverhaltens per Video und einer worst-case Prüfung zu finden. Da sowohl die direkte als auch die indirekte Bestimmung des Rastmoments bzw. der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nicht bei allen Varianten möglich ist, kann über die worst-case Prüfung entschieden werden, inwieweit die Lagervariante den in Kapitel 8.1 genannten Anforderungen an eine rotationsfreie Lagerung für die Nutzung in einer Magnetschwebewaage entspricht. In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Lagervarianten mit den genannten Messmethoden auf Funktionalität geprüft.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 8.5.1 Übersicht der Lagervarianten zur Funktionsprüfung mit den zugehörigen Berechnungswerten

| Prinzip Variante | Formänderung | | | | | Drehfeld |
|-------------------------------|---|-------------------------------------|---|--------------------------------------|---|--|
| | 1-1-a | 1-1-b | 1-2-a | 1-2-c | 1-2-f | |
| Ausführung | eckig | Zähne | Zähne | | | 3-1-a 2-Zahn Rotor 3 Stator Spulen ohne |
| zusätzliche Erregung | ohne | ohne | permanentmagnetisch | | | |
| gewählte Parameter | | Anzahl Zähne: 4 Zahnhöhe h: 5 mm | Anzahl Zähne: 4; Zahnhöhe h: 5 mm; Flächenfaktor F: 1 Dauermagnete axial magnetisiert in z-Richtung Platzierung der Dauermagnete in: | | | Spule 1: -1000A Rotorbreite: 70 mm Rotorhöhe: 0,8 mm Rotorhöhe: 32 mm ohne Eisenrück- schluss |
| Kriterien | nutzt max. Bauraum l: 35 mm | Flächenfaktor F: 1 | Haltemagnet (Lücken) | Haltemagnet & Schwebemagnet (Lücken) | Haltemagnet & Schwebemagnet (auf Zähne) | |
| | -250 | -300 | -3800 | -19662 | -6175 | -13 |
| | -19 | -44 | -270 | -1470 | -730 | -4 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $F_y: 0; F_y': 0,1$ $F_z: 0; F_z': 0,02$ |
| zusätzliche Regelung? | nicht notwendig | nicht notwendig | nicht notwendig | nicht notwendig | nicht notwendig | DC je Spule |
| Bild |  | | | | |  |
| Variante für Funktionsprüfung | | | | | | |

8.5.1. Prinzip: Formänderung mittels quadratischen Gehäuses ohne zusätzliche Erregung

Variante 1-1-a besitzt nach dem Prinzip der Formänderung ein rechteckiges Gehäuse ohne zusätzliche permanentmagnetische Erregung. Die Funktionsprüfung beinhaltet die Bestimmung des Drehmoments mittels Federwaage. Diese Messmethode lässt sich bei diesem Lager nicht anwenden. Die zu messenden Momente sind so gering, dass durch das Anlegen der Federwaage der stabile Schwebezustand gestört wird. Daher soll über die Aufzeichnung des Rotationsverhaltens das Rastmoment und der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie indirekt bestimmt werden.

Durch die in Kapitel 6.6 vorgestellte Messmethode zur Untersuchung des Rotationsverhaltens, lässt sich nach Gleichung (6.6.4) eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von $-71 \mu\text{Nm/deg}$ bestimmen. Ab einem Abstand von ca. 3,5 mm zwischen Druckluftanströmung und Rotationsachse beginnt sich das Lager zu drehen. Mit diesem Wert für den Hebelarm und die bekannte Kraft durch den beaufschlagten Druck von 92 mN, ergibt sich nach Gleichung (6.3.4) ein Rastmoment von ca. $-320 \mu\text{Nm}$. Die bei der worst-case Prüfung entstehende Pendelbewegung um $\pm 12^\circ$, bestätigt dass die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie den Anforderungen nicht genügt.

8.5.2. Prinzip: Formänderung mittels Zahnung ohne zusätzliche Erregung

Kapitel 8.4.2 enthält die Berechnung für das Magnetlager nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahngeometrie ohne zusätzliche permanentmagnetische Erregung. Die direkte Bestimmung des Rastmoments, kann auch bei diesem Lager nicht mit der Federwaage durchgeführt werden, da die Messung selbst den Schwebezustand stört. Aus der Analyse des Rotationsverhaltens per Video lässt sich mit der Messmethode aus Kapitel 6.6 nach (6.6.4) eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von $-89 \mu\text{Nm/deg}$ berechnen. Ab einem Abstand von 10 mm zwischen Druckbeaufschlagung und Rotationsachse entsteht eine Rotation um die z-Achse. Daraus lässt sich mit (6.3.4) ein Rastmoment von ca. $-920 \mu\text{Nm}$ berechnen. Durch die Druckbeaufschlagung der worst-case Prüfung wird das Lager zu einer Pendelbewegung um $\pm 5^\circ$ angeregt. Das bestätigt noch einmal, dass die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie die Anforderungen nicht erfüllt.

8.5.3. Prinzip: Formänderung mittels Zahnung mit zusätzlicher Erregung

Aus der Berechnung in Kapitel 8.4.3. haben sich drei Lagervarianten nach dem Prinzip der Formänderung mittels Zahnung und zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung als geeignet zur rotationsfreien Lagerung in einer Magnetschwebewaage erwiesen. Im Folgenden werden die drei Varianten 1-2-a, 1-2-c und 1-2-f mit den Parametern aus Tabelle 8.5.1 auf Funktionalität geprüft.

Lagervariante: 1-2-a

Zunächst wird die Prüfung von Lagervariante 1-2-a durchgeführt. Dieses Lager besitzt in jeder der vier Lücken des Haltemagneten, Permanentmagnete axial magnetisiert nach Bild 8.4.3.1. Diese vier Permanentmagnete besitzen die gleiche Magnetisierungsrichtung wie der im Schwebemagnet mittig sitzende Dauermagnet aus Bild 7.3.1. Die Messung des vorherrschenden Rastmoments mit der Federwaage ist auch bei dieser Lagervariante nicht möglich (Kapitel 8.5.2). Das Lager kann für die Untersuchung des Rotationsverhaltens mit dem in Kapitel 6.6. angegebenen Druck nicht zur Rotation angeregt werden, da das vorherrschende Rastmoment und die Steilheit der Drehmoment-Kennlinie höher sind als das durch die Druckbeaufschlagung erzeugte Drehmoment. Somit besitzt das Lager ein genügend hohes Rastmoment nach Kriterium 1 (Kapitel 8.1) und eine ausreichende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nach Kriterium 2 (Kapitel 8.1). Weiterhin kann die Rotation auch bei dem größten möglichen Abstand von 17,5 mm (Durchmesser des Lagers) zwischen Rotationsachse und Druckbeaufschlagung die Rotation nicht angeregt werden. Daraus lässt sich nach Gleichung (6.3.4) ein Rastmoment von mindestens $-1600 \mu\text{Nm}$ ermitteln.

Lagervariante: 1-2-c

Lager 1-2-c enthält sowohl im Gehäuse des Halte- als auch des Schwebemagnet in den Lücken Permanentmagnete, die in der Magnetisierungsrichtung mit dem im Schwebemagneten mittig sitzenden Permanentmagneten übereinstimmen. Auch hier lässt sich das vorherrschende Drehmoment nicht mit der Federwaage bestimmen (Kapitel 8.5.2). Ebenso wie Lagervariante 1-2-a lässt es sich mit der Druckbeaufschlagung (Kapitel 6.6) nicht zur Rotation anregen. Somit weist diese Lagervariante ein ausreichendes Rastmoment nach Kriterium 1 (Kapitel 8.1) und eine

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

genügend große Steilheit der Drehmoment-Kennlinie nach Kriterium 2 auf. Eine außermittige Druckbeaufschlagung mit einem Abstand von 17,5 mm (Durchmesser des Lagers) zwischen Druckbeaufschlagung und Rotationsachse ohne beginnende Rotation, zeigt das nach Gleichung (6.3.4) ein Rastmoment von mind. $-1600 \mu\text{Nm}$ vorherrscht. Die Kriterien 1 (ausreichend Rastmoment) und 2 (genügend große Steilheit der Drehmoment-Kennlinie) zur Erstellung eines rotationsfreien Lagers für die Verwendung in einer Magnetschwebewaage sind damit erfüllt.

Lagervariante: 1-2-f

In der Lagervariante 1-2-f sind jeweils auf den Zähnen des Halte- und Schwebemagneten, Permanentmagnete mit geringerer Höhe wie bei Variante 1-2-a und 1-2-c angeordnet. Die Magnetisierungsrichtung der Permanentmagnete entspricht denen der Lagervarianten 1-2-a und 1-2-f. Die direkte Messung des Drehmoments ist auch bei dieser Lagervariante nicht möglich (Kapitel 8.5.2). Durch die Druckbeaufschlagung (Kapitel 6.6) kann das Lager nicht zur Rotation angeregt werden, auch bei einem maximalen Abstand von 17,5 mm zwischen Druckbeaufschlagung und Rotationsachse. Damit ergibt sich ein vorherrschendes Rastmoment von mindestens $-1600 \mu\text{Nm}$. Auch die abschließende worst-case Prüfung bestätigt, dass die Kriterien 1 (ausreichendes Rastmoment) und 2 (genügend große Steilheit der Drehmoment-Kennlinie) erfüllt sind.

8.5.4. Prinzip: Drehfeld ohne zusätzliche Erregung

Variante 3-1-a soll nach dem Prinzip des Drehfeldes eine rotationsfreie Lagerung ermöglichen. Die direkte Messung des Rastmoments ist auch bei diesem Lager mit der Federwaage nicht möglich (Kapitel 8.5.2). Das Rotationsverhalten kann nach Anregung (Kapitel 6.6) aufgezeichnet werden und ergibt nach Auswertung eine Steilheit der Drehmoment-Kennlinie von $-55 \mu\text{Nm/deg}$. In der worst-case Prüfung zeigt das Lager eine Pendelbewegung von $\pm 20^\circ$. Weiterhin ist erkennbar, dass sich dieses Lager instabiler verhält als die vorhergehenden Varianten. Die bestehenden Querkräfte können zwar nicht bestimmt werden, aber es ist eine der Pendelbewegung überlagerte Querschwingung feststellbar, die durch diese Querkräfte verursacht sein können.

8.6. Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungsergebnissen

Die Kapitel 8.5.1 bis 8.5.4 enthalten die Ergebnisse der Funktionsprüfung der einzelnen Lagervarianten. Im Folgenden werden diese Ergebnisse mit den Werten aus den Berechnungen (Kapitel 8.4.1 bis Kapitel 8.4.4) verglichen. Eine Übersicht dazu enthält Tabelle 8.6.1. Darin ist, neben den einzelnen Ergebnissen aus der Berechnung und den Messwerten das Resultat aus allen Ergebnissen genannt.

Die Messwerte zeigen tendenziell den gleichen Verlauf wie die Berechnungsergebnisse. Allerdings stimmen die Werte quantitativ nicht überein. Dies hat verschiedene Ursachen: Das System der schwebenden Baugruppe von Haltemagnet mit Probe hat einige Freiheitsgrade, die eine mechanische Messung des Rastmoments mittels Federwaage nicht möglich macht, da durch Anlegen der Federwaage die stabile Lagerung der schwebende Baugruppe gestört wird. Weiterhin ist die indirekte Bestimmung der Drehmomente nach Methode aus Kapitel 6.6 mit einigen Messfehlern behaftet. Es lässt sich der Abstand zwischen Druckbeaufschlagung und Rotationsachse nicht exakt bestimmen (Kapitel 6.3). Gleiches gilt für die Bestimmung des Abstands zwischen Halte- und Schwebemagnet. Dieser geht sehr stark in die Messergebnisse ein, vor allem bei den Funktionsmustern (1-1-a, 1-1-b, 1-2-a, 1-2-c, 1-2-f) mit dem Prinzip der Formänderung, da sich bei zunehmenden Abstand die wirkenden Drehmomente verringern. Daneben werden durch die Anregung zur Rotation Querkräfte auf das Lager aufgebracht, die das Messergebnis verfälschen können. Zudem wird dabei die Zentrierung des Halte- zum Schwebemagneten beeinflusst, wodurch sich die wirkenden Kräfte bzw. Momente ebenfalls verändern. Aus diesem Grund dient vor allem die worst-case Prüfung als abschließendes Kriterium, inwieweit eine Lagervariante die genannten Anforderungen zur rotationsfreien Lagerung ein einer Magnetschwebewaage erfüllt (Kapitel 6.6).

Dadurch ist ein Vergleich der quantitativen Werte zwischen Berechnung und Messung nur bedingt möglich. Allerdings zeigt der qualitative Vergleich zwischen Messwerten und Berechnungsergebnissen die gleiche Tendenz und hinsichtlich Erfüllung der Anforderungskriterien 1 (ausreichendes Rastmoment) und 2 (genügend große Steilheit der Drehmoment-Kennlinie) die gleichen Ergebnisse (Kapitel 8.1). Alle Lagervarianten die Kriterium 1 und/oder 2 nicht erfüllen, besitzen auch bei der worst-case Prüfung unzureichende Eigenschaften.

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 8.6.1 Vergleich der Ergebnisse aus Berechnung und Messung aller Funktionsmuster

| Prinzip Variante | Formänderung | | | | | Drehfeld |
|---|----------------------------------|---|---|--------------------------------------|---|---|
| | 1-1-a | 1-1-b | 1-2-a | 1-2-c | 1-2-f | |
| Ausführung | eckig | Zähne | | Zähne | | 3-1-a |
| zusätzliche Erregung | ohne | ohne | | permanentmagnetisch | | 2-Zahn Rotor 3 Stator Spulen ohne |
| gewählte Parameter | nutzt max. Bauraum l: 35 mm | Anzahl Zähne: 4 Zahnhöhe h: 5 mm Flächenfaktor F: 1 | Anzahl Zähne: 4; Zahnhöhe h: 5 mm; Flächenfaktor F: 1 Dauermagnete axial magnetisiert in z-Richtung Platzierung der Dauermagnete in: | | | Spule 1: -1000A Rotordicke: 70 mm Rotorbreite: 0,8 mm Rotorhöhe: 32 mm ohne Eisenrück- schluss |
| | | | Haltemagnet (Lücken) | Haltemagnet & Schwebemagnet (Lücken) | Haltemagnet & Schwebemagnet (auf Zähne) | |
| Kriterien | | | | | | |
| Ergebnisse aus Berechnung | | | | | | |
| Kriterium 1: M_{bst} [μNm] $M_{\text{Soll}} > 92 \mu\text{Nm}$ | -250 | -300 | -3800 | -19662 | -6175 | -13 |
| Kriterium 2: $dM/d\alpha$ [$\mu\text{Nm/deg}$] $dM/d\alpha > 92 \mu\text{Nm/deg}$ | -19 | -44 | -270 | -1470 | -730 | -4 |
| Messwerte | | | | | | |
| Federwaage | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Rotationsverhalten | Kriterium 1 | -920 | mind. -1600 | mind. -1600 | mind. -1600 | --- |
| | Kriterium 2 | -71 | --- | --- | --- | -55 |
| worst-case-Prüfung | Pendelbewegung um $\pm 12^\circ$ | Pendelbewegung um $\pm 5^\circ$ | stabil; rotationsfrei | stabil; rotationsfrei | stabil; rotationsfrei | Pendelbewegung um $\pm 20^\circ$ |
| Resultat | | | | | | |
| Anforderungen | nicht erfüllt | nicht erfüllt | erfüllt | erfüllt | erfüllt | nicht erfüllt |

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Tabelle 8.6.1 enthält alle Ergebnisse aus Messung und Berechnung der einzelnen Lagervarianten. Somit ist deutlich ersichtlich, dass die Lagervarianten 1-2-a, 1-2-c und 1-2-f nach dem Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung, alle Anforderungen für eine stabile rotationsfreie Lagerung erfüllen, um neben dem thermogravimetrischen Signal auch eine Differenzthermoanalyse mit einer Magnetschwebewaage durchführen zu können.

8.7. Zusammenfassung aus Berechnung und Prüfung der rotationsfreien Lagerung

Kapitel 8.1 enthält die Anforderungen an eine stabile rotationsfreie Lagerung für die Anwendung in einer Magnetschwebewaage zur simultanen Durchführung der Thermogravimetrie und der Differenzthermoanalyse, wie in Kapitel 6.1 beschrieben. Daraus ergeben sich drei theoretisch geeignete Prinzipien (Formänderung, Rastierung, Drehfeld), die mit den zugehörigen Berechnungen von verschiedenen Untervarianten in Kapitel 8.4 enthalten sind. Aus der Gegenüberstellung der detaillierten Berechnungsergebnisse in Kapitel 8.4.6 zeigt sich, dass das Prinzip der Rastierung für die rotationsfreie Lagerung ungeeignet ist. Daher wird ein Funktionsmuster nach diesem Prinzip nicht aufgebaut und geprüft. Tabelle 8.5.1 enthält daher eine Übersicht aller aufgebauten Funktionsmuster, die in Kapitel 8.5.3 einer ausführlichen Prüfung unterzogen werden. Die Ergebnisse der Berechnung zeigen, dass nur die Lagervarianten nach dem Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung alle in Kapitel 8.1 genannten Anforderungen an eine rotationsfreie Lagerung erfüllen. Das Prinzip der Formänderung ohne zusätzliche Erregung (Variante 1-1-a und 1-1-b) besitzt zwar ein ausreichendes Rastmoment (Kriterium 1), aber keine ausreichende Steilheit der Drehmoment-Kennlinie (Kriterium 2). Mit der Variante 3-1 (Prinzip des Drehfeldes) kann der Rotor in jeder beliebigen Stellung positioniert werden. Theoretisch lassen sich – je nach Ausführung (Rotorgröße, Verwendung eines Rückschlussgehäuses; Rotormaterial) – damit die Kriterien 1 und 2 erfüllen, jedoch entstehen dabei Querkräfte (Kriterium 4, Kapitel 8.1) auf den Rotor, die nicht vermeidbar sind. Durch den Funktionsmustersaufbau (Variante 3-1) mit einem Stahlrotor ohne Rückschlussgehäuse sind die Querkräfte auf ein Minimum reduziert, allerdings sind das Rastmoment und die Steilheit der Drehmoment-

8 – Untersuchungen zur Entwicklung eines rotationsfreien Magnetlagers für die Magnetschwebewaage

Kennlinie zu gering (Kriterien 1 und 2, Kapitel 8.1). Das Prinzip des aktiven Lagers, welches zusätzliche Abstandssensoren mit dem Drehfeld bzw. der Rastierung vereint – weist zu viele Nachteile (hinsichtlich auftretender Querkkräfte, sowie hohem konstruktiven Aufwand (Baugröße, Materialien, etc.) auf (s. Kapitel 8.3) und kann somit, bereits nach der Gegenüberstellung aller Eigenschaften, für die weitere Berechnung und Prüfung verworfen werden.

Die Ergebnisse der Funktionsprüfung sind zusammen mit den Ergebnissen aus der Berechnung in Tabelle 8.6.1 enthalten. Dabei zeigt sich, dass die Messmethoden stark Fehler behaftet sind, die Messergebnisse allerdings die gleiche Tendenz wie die Berechnungsergebnisse aufweisen. Als abschließendes Bewertungskriterium eines Lagers hat sich deshalb die worst-case Prüfung durchgesetzt.

Das Resultat aus der Funktionsprüfung bestätigt die Ergebnisse der Berechnungen hinsichtlich der Eignung für die Anwendung in der Magnetschwebewaage zur rotationsfreien Lagerung der einzelnen Lagervarianten.

Die Varianten 1-1-a, 1-1-b und 3-1 bleiben während dieser Prüfung nicht stabil, sondern Pendeln um einen Auslenkungswinkel $\gg 1^\circ$ (Kriterium 2, Kapitel 8.1) hin und her und sind daher ungeeignet.

Die worst-case Prüfung der Lagervarianten 1-2-a, 1-2-c und 1-2-f zeigen ein stabiles rotationsfreies Verhalten. Somit sind alle drei Lagervarianten für die Anwendung in der Magnetschwebewaage – zur Realisierung einer stabilen Lagerung nach den Anforderungskriterien aus Kapitel 8.1 – einsetzbar. Allerdings besitzt Variante 1-2-a, gegenüber den Varianten 1-2-c und 1-2-f, den Vorteil, dass weniger Gewicht im Schwebemagneten durch die geringere Anzahl von zusätzlichen Dauermagneten gegeben ist. Ein geringeres Gewicht des Schwebelagers, bedeutet eine größere Messgenauigkeit des thermogravimetrischen Signals (Kapitel 6.5). Außerdem ist damit diese Lagervariante kostengünstiger. Daher ist eindeutig Variante 1-2-a vorzuziehen. Einziger Nachteil dieses Lagers ist die fehlende Möglichkeit der aktiven Positionierbarkeit (Kriterium 5). Diese lässt sich durch die Anbringung eines Stellmotors zwischen Waage und Haltemagnet umgehen (Kapitel 6.2).

9 Einbindung der neuen rotationsfreien Magnetlagerung in die Magnetschwebewaage

Kapitel 8 enthält, angefangen von den Anforderungen an ein rotationsfreies Magnetlager für die Anwendung in einer Magnetschwebewaage, über die verschiedenen Prinzipien einer solchen Lagerung, die Berechnung unterschiedlicher Lagervarianten und deren Funktionsprüfung. Nur das Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung zeigt in den Ergebnissen aus Berechnung und Messung geeignete Eigenschaften nach den Anforderungskriterien aus Kapitel 8.1. Die Variante mit der Bezeichnung 1-2-a ist nach diesem Prinzip mit vier Zähnen, einer Zahnhöhe von 5 mm und einem Flächenfaktor nach (8.4.2.11) von 1 ausgeführt. In den vier Lücken des Haltemagneten sitzen vier Permanentmagnete. Diese Lagervariante kann ohne Änderung der Konstruktion, an Messzelle oder anderen Baugruppen der Magnetschwebewaage, eingebaut werden. Einziger Nachteil – die fehlende Möglichkeit zur aktiven Positionierbarkeit – lässt sich durch die Anbringung eines Stellmotors zwischen Waage und Haltemagnet umgehen (s. Kapitel 6.2). Tabelle 9.1 enthält alle Eckdaten des rotationsfreien Magnetlagers. Bild 8.4.3.3 zeigt die Vektordarstellung der magnetischen Flussdichte des entwickelten rotationsfreien Lagers und Bild 8.4.3.4 die zugehörige Drehmoment-Kennlinie. Die Zeichnung des entwickelten Lagers ist in Bild 9.1 zu finden.

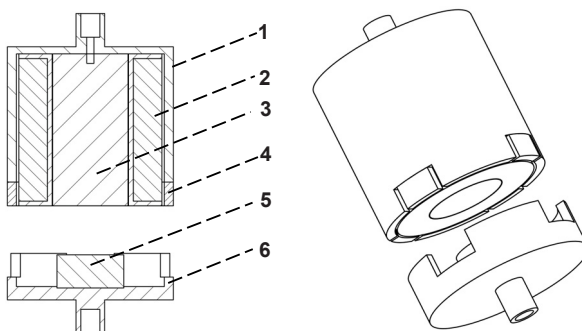


Bild 9.1 Zeichnung der entwickelten rotationsfreien Lagervariante 1-2-a nach Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung mit 1 Gehäuse Haltemagnet mit Zahnung; 2 Spule; 3 Eisenkern; 4 Permanentmagnete in der Zahnung des Gehäuses im Haltemagneten; 5 Permanentmagnet; 6 Gehäuse Schwebemagnet

9 – Einbindung der neuen rotationsfreien Magnetlagerung in die Magnetschwebewaage

Tabelle 9.1 Eckdaten des rotationsfreien Lagers nach Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung nach Variante 1-2-a zum Einsatz in der Magnetschwebewaage zur simultanen Durchführung von Thermogravimetrie und Differenzthermoanalyse

| Abmessungen des Lagers | | |
|--|--|--------------------|
| Gesamthöhe | ca. 51 | mm |
| Durchmesser | ca. 35 | mm |
| Material | | |
| Beide Gehäuse und Eisenkern | Automatenstahl 11SMn30 (1.0715) | |
| Permanentmagnete | Samariumcobalt $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ | |
| Daten der Spule | | |
| Wicklungsanzahl | 3500 | --- |
| Kupferdrahtdurchmesser | 0,2 | mm |
| Widerstand | 145 | Ω DC |
| Induktivität | 133 | mH (1000 Hz) |
| Leistung | 4 | W |
| Betriebsspannung | 24 | V |
| Abmessungen der Zahngeometrie im Haltemagneten | | |
| Anzahl der Zähne | 4 | -- |
| Zahnhöhe | 5 | mm |
| Flächenfaktor | 1 | --- |
| Zusätzliche permanentmagnetische Erregung | | |
| Anzahl der Permanentmagnete | 4 | |
| Magnetisierungsrichtung | wie Dauermagnet im Schwebemagneten | |
| Höhe | 5 | mm |
| Länge | 8 | mm |
| Eigenschaften des Lager nach den Anforderungskriterien | | |
| Kriterium 1: M_{lst} $M_{\text{Soll}} > 92 \mu\text{Nm}$ | erfüllt -3800 | μNm |
| Kriterium 2: $dM/d\alpha$ $dM/d\alpha > 92 \mu\text{Nm/deg}$ | erfüllt -270 | $\mu\text{Nm/deg}$ |
| Kriterium 3 $dM/d\alpha < 0$; $\Sigma M = 0$ | erfüllt | |
| Kriterium 4: $F_x = F_y = F_x' = F_y' = 0 \text{ N}$ | erfüllt | |
| Kriterium 5 <i>Aktiv positionierbar?</i> | nicht erfüllt, aber mit zusätzlichen Stellmotor möglich | |
| Kriterium 6 <i>zusätzliche Regelung?</i> | nicht notwendig | |
| Kriterium 7 <i>Konstruktion / Kosten</i> | + einfacher Aufbau + keine Änderung an Gesamtkonstruktion der Magnetschwebewaage notwendig + Gehäuseform leicht herstellbar - zusätzlich Dauermagnete notwendig | |

10 Zusammenfassung

In vorliegender Dissertation wurde die Realisierung eines rotationsfreien stabilen Lagers für den Einsatz in einer Magnetschwebewaage untersucht. Mit einer solchen Lagerung kann neben dem thermogravimetrischen Signal auch eine Differenzthermoanalyse durchgeführt werden. Die Differenzthermoanalyse ist, durch die schwebende Lagerung der Probe in der Messzelle, nicht konventionell mit Thermoelemente realisierbar. Daher soll auf eine pyrometrische Temperaturmessung zurückgegriffen werden. Dazu ist geplant – durch ein Sichtfenster in der Messzelle hindurch – die Temperatur der stabil rotationsfrei gelagerten Probe, mittels Pyrometer zu bestimmen. Daraus ergeben sich bestimmte Anforderungen an die Lagerung der Probe, die einerseits eine stabile berührungsfreie Kraftübertragung und andererseits eine rotationsfreie Lagerung ermöglichen muss.

Um beiden Anforderungen gerecht zu werden, sollte mit Hilfe einer theoretischen Betrachtung geklärt werden, welche Voraussetzungen zur Realisierung eines Schwebezustands notwendig sind. Anhand der Auswahlkriterien lässt sich prüfen, welche Prinzipien sich zur rotationsfreien Lagerung für die Anwendung in einer Magnetschwebewaage eignen. Außerdem ist der Stand der Technik von Magnetlagern zur berührungsfreien Kraftübertragung in der Magnetschwebewaage angeführt und wird mit dem im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelten Lager verglichen. Zudem wird betrachtet welche äußeren Kräfte bzw. Momente eine Rotation des Magnetlagers in einer Magnetschwebewaage anregen. Mit dieser Kenntnis lässt sich untersuchen, wie die Robustheit des Magnetlagers optimiert werden kann.

Bevor mit der Auslegung eines rotationsfreien Lagers begonnen werden kann, muss zuerst ein rotationssymmetrisches Lager zur berührungsfreien Kraftübertragung aufgebaut werden. Dazu werden die Möglichkeiten zur Realisierung beschrieben, um eine geeignete Variante aufzubauen und zu prüfen.

Danach erfolgt die detaillierte Betrachtung der rotationsfreien Lagerung. Die Anforderungen an ein solches Lager werden mit sieben Auswahlkriterien definiert.

Damit ist es möglich, die Möglichkeiten zur Realisierung gegenüberzustellen. Aus dieser Betrachtung ergeben sich vier theoretische Prinzipien (Formänderung, Rastierung, Drehfeld, aktives Lager mit Rastierung / Drehfeld), die eine Erfüllung der Anforderungskriterien ermöglichen. Bereits die Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile zusammen mit den Auswahlkriterien beschränkt die theoretischen Prinzipien auf: Formänderung, Rastierung und Drehfeld. Diese drei Prinzipien werden detailliert in einzelnen Untervarianten berechnet und geeignete Lösungen als Funktionsmuster aufgebaut und geprüft.

Für die Prüfung aller Funktionsmuster wurde ein geeigneter Versuchsstand aufgebaut und zugehörige Messmethoden entwickelt. Die Prüfung des rotationssymmetrischen Funktionsmusters mit der Anforderung der stabilen berührungsfreien Kraftübertragung zeigt, dass die Werte aus Berechnung und Messung hinsichtlich der Kraft-Hub-Kennlinie gut übereinstimmen. Dieses Resultat belegt, dass die verwendeten Berechnungsmodelle für den vorliegenden Fall geeignet sind und die Realität gut abbilden.

Die Funktionsprüfung der rotationsfreien Lagervarianten ergibt, dass die Berechnungsergebnisse und die Messwerte tendenziell zusammenpassen, quantitativ sind starke Abweichungen vorhanden. Durch die sehr kleinen vorherrschenden Momente sind die gewählten Messmethoden Fehler behaftet. Alternative Messmethoden gibt es derzeit nicht. Allerdings bestätigt die Gesamtheit der Messergebnisse das Resultat aus der Berechnung. Varianten, die in der Berechnung alle Anforderungen an eine rotationsfreie Lagerung erfüllen, halten auch einer worst-case Prüfung stand.

Als Resultat aus Berechnung und Messung hat sich das Prinzip der Formänderung mit zusätzlicher permanentmagnetischer Erregung als geeignet erwiesen. Damit wird mit einer Zahnung in den Gehäusen des Halte- und Schwebemagneten und zusätzlichen Dauermagneten in den Zahnücken des Haltemagneten ein rotationsfreies Lager realisiert. Die vorhergehenden Kapitel beschreiben diese Lagervariante hinsichtlich optimaler Größenverhältnisse der Zahnung, Magnetisierungsrichtung der zusätzlichen Dauermagnete und den anderen Eckdaten dieses entwickelten Magnetlagers. Dieses

Magnetlager erfüllt alle Anforderungen an eine stabile rotations- und berührungsfreie Lagerung für den Einsatz in einer Magnetschwebewaage. Es kann ohne Änderung an der Konstruktion der Magnetschwebewaage direkt eingesetzt werden. Der einzige Nachteil dieser Lagervariante besteht darin, dass die aktive Positionierung der Probe um die z-Achse nicht möglich ist. Dies kann mit einem zusätzlichen Stellmotor, der zwischen Waage und Haltemagnet angebracht ist, realisiert werden.

Mit dem Einsatz des neu entwickelten Magnetlagers in der Magnetschwebewaage, ist neben der thermogravimetrischen Messung auch eine Differenzthermoanalyse, mittels Pyrometrie durchführbar. Dadurch kann mit der neuen Magnetschwebewaage ein zusätzliches Messsignal erfasst und eine Lösung gefunden werden, die den aktuellen Stand der Technik übertrifft.

11 Literaturverzeichnis

- [1] Hemminger, W.F., Cammenga, H.K.: Methoden der Thermischen Analyse, Springer-Verlag (1989)
- [2] Earnshaw, S.: On the Nature of the Molecular Forces with regulate the Constitution of the Luminiferous Ether, Transaction of the Cambridge Philosophical Society 7, 97-112 (1842)
- [3] Clark, J.W.: An Electronical Analytical Balance, Rev. Sci. Instr. 18, 915-918 (1947)
- [4] Gast, Th.: Waagen mit frei schwebender, magnetischer Aufhängung, Naturwissenschaften 56, 434-438 (1969)
- [5] Gast, Th.: Wägen im Magnetfeld, Umschau, 10 (1969)
- [6] Gast, Th.: Neuere Beispiele für die Anwendung regelungstechnischer Prinzipien in der Messtechnik, VDI-2113, 347-454 (1971)
- [7] Gast, Th., Wagner, F.E.: Progress in the Development of Freely Suspended Vacuums Top Pan Balances for Thermogravimetry, Thermal Analysis Vol. 3, Proceedings Fourth ICTA Budapest (1974)
- [8] Gast, Th.: A New Magnetic Coupling for the Separation of Microbalance and Reaction Vessel in Experiments with Controlled Atmosphere, Thermochemica Acta, 24, 247-250 (1978)
- [9] Wagner, F.E.: Untersuchung eines einfachen, horizontal gesteuerten Schwebesystems unter Mess- und Regelungstechnischen Gesichtspunkten, Dissertation, Technische Universität Berlin (1973)

- [10] Wagner, F.E., Gast, Th.: Ein Beitrag zur berührungslosen Messung von Kräften, Wd. 1, 7-13 (1975)
- [11] Wagner, F.E., Mirahmadi, A.: Contributions to the Development of Freely Suspended Top Balances, *Thermochimica*, 24, 227-241 (1978)
- [12] Lösch, H.W.: Entwicklung und Aufbau von neuen Magnetschwebewaagen zur berührungsfreien Messung vertikaler Kräfte, VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 3, Nr. 138, VDI-Verlag, Düsseldorf (1987)
- [13] Lösch, H.W., Kleinrahm, R., Wagner, W.: Neue Magnetschwebewaage für gravimetrische Messungen in der Verfahrenstechnik, *Chemie Ingenieur Technik*, 66, Nr. 8, 1055-1058 (1994)
- [14] Lösch-Will, C.: Entwicklung und Aufbau neuer Dichtemessapparaturen auf der Basis von Magnetschwebewaagen, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum (2006)
- [15] Will, C.: Entwicklung, Aufbau und Programmierung einer mikrocontroller-gesteuerten Regelung für Magnetschwebelager, Nichtveröffentlichte Arbeiten des Lehrstuhls für Thermodynamik, Ruhr-Universität Bochum (1996)
- [16] Kleinrahm, R., Wagner, W.: Entwicklung und Aufbau einer Dichtemessanlage zur Messung der Siede- und Tauchdichten reiner fluider Stoffe auf der gesamten Phasengrenzkurve. Fortschrittberichte VDI-Z., Reihe 3, Nr. 92, VDI-Verlag, Düsseldorf (1984)
- [17] Kleinrahm, R., Wagner, W.: *J. Chem. Thermodyn.* 18, 739 (1986)
- [18] Brachthäuser, K., Kleinrahm, R., Lösch, H.W., Wagner, W.: Entwicklung eines neuen Dichtemessverfahrens und Aufbau einer Hochtemperatur-Hochdruck-Dichtemessanlage, Fort.-Ber. VDI-Z. Reihe 8, Heft 371, VDI-Verlag, Düsseldorf (1993)

- [19] Wagner, W., Brachthäuser, K., Kleinrahm, R., Lösch, H.W.: A new, accurate single-sinker densitometer for temperatures from 233 K to 523 K at pressures up to 30 MPa, *Int. J- Thermophysics*, 16(2), 399-411 (1995)
- [20] Haynes, W.M., Hiza, M.J., Frederick, N.V.: Magnetic Suspension Densimeter for Measurements on Fluids of Cryogenic Interest, *Rev. Sci. Instrum.* 47, 1237-1250 (1976)
- [21] Masui, R., Davis, H.A., Levelt Sengers, J.M.H.: A New Magnetic Suspension Densimeter for Determining Fluid Densities by Weighing, *Proc. Of the Eighth Symp. On Thermophysical Properties*, Vol. 1; ASME, New York, 182-133 (1982)
- [22] Hales, J.L.: An Apparatus for Accurate Measurement of liquid Densities Over an Extended Temperature Range, *J. of Physics*, E3, 855-861 (1970)
- [23] Hodgins, M.G., Beams, J.W.: Magnetic Densimeter-Viscosimeter, *Rev. Scientific Instruments*, 42, 1455-1457 (1971)
- [24] Beams, J.W., Clark, A.M.: Magnetic Suspension Balance Method for Determining Densities and Partial Specific Volumes, *Rev. Scientific Instruments*. 33, 750-753 (1962)
- [25] Hosseini, R.S.A.: Entwicklung und Aufbau neuer Sorptionsmessapparaturen auf der Basis von Magnetschwebewaagen, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, (2003)
- [26] Rubotherm, Magnetic Suspension Balances, Druckschrift der Firma Rubotherm Präzisionsmesstechnik GmbH (2009)
- [27] Lombardi, G.: For Better Thermal Analysis, 2nd ed., published by the International Confederation for Thermal Analysis (ICTA) (1980)

- [28] Voigt, F.: Überlegungen und Demonstrationen zu Möglichkeiten des Schwebens von Körpern in elektromagnetischen Feldern, Studienarbeit in Angewandter Physik, Universität Oldenburg (1999)
- [29] Pelrine, R.E.: Stabil in der Schwebe; Spektrum der Wissenschaft (2005)
- [30] Küstler, G.: Diamagnetic Levitation - Historical Milestones, Rev. Roum. Sci. Techn. - Électrotechn. Et Énerg., 52, 3, p. 265-282, Bucarest (2007)
- [31] Scharlau, B., Nordmeier, V., Schlichting, H.J.: Magnetische Levitation, Deutsche Physikalische Gesellschaft: Didaktik der Physik, Augsburg, Berlin (2003)
- [32] Stölting, H.D., Kallenbach, E., Amrhein, W.: Handbuch Elektrische Kleinantriebe, Carl Hanser Verlag, München Wien, 4. Auflage (2011)
- [33] Kallenbach, E., Bögelsack, G.: Gerätetechnische Antriebe, Carl Hanser Verlag, München Wien (1991)
- [34] Braunbeck, W.: Freischwebende Körper im elektrischen und magnetischen Feld, Zeitschrift für Physik 112, 753-763 (1939)
- [35] Braunbeck, W.: Freies Schweben diamagnetischer Körper im Magnetfeld, Zeitschrift für Physik 112, 764-769 (1939)
- [36] Boerdijk, A.H.: Freischwebende Körper in statischen Magnetfeldern, Phillips', Technische Rundschau 18, 59-62 (1957)
- [37] Bohl, W.: Technische Strömungslehre, Technik, Kompaktlehrbuch, Kamprath-Reihe, Vogel-Verlag, Würzburg (1978)
- [38] Werkstoffdatenblatt für CuBe₂, Brush-Wellmann GmbH, Stuttgart (1990)

- [39] Hering, E., Martin, R., Stohrer, M.: Physik für Ingenieure, Springer (2002)
- [40] Holzmann, G., Meyer, H., Schumpich, G.: Technische Mechanik Kinematik und Kinetik, Vieweg und Teubner Verlag (2010)
- [41] Kuchling, H.: Taschenbuch der Physik, Fachbuch Verlag im Carl Hanser Verlag, 19. Auflage (2007)
- [42] Kallenbach, E., Eick, R., Quendt, P., Ströhla, T., Feindt, K., Kallenbach, M.: Elektromagnete Grundlagen, Berechnung, Entwurf und Anwendung, Teubner (2003)
- [43] Berardinelli, A.: Über den Entwurf eines permanentmagneterregten Linearmotors; Shaker Verlag, Aachen (2008)
- [44] Bödrich, T.: Electromagnetic Actuator Modelling with the Extended Modelica Magnetic Library, Institute of Elektromechanical and Electronic Design, Dresden University of Technology, The Modelica Association (2008)
- [45] Wikipedia, Halbach Array, 02.11.2012
- [46] Rummich, E., Gfrörer, R.: Elektrische Schrittmotoren und -Antriebe, Funktionsprinzip - Betriebseigenschaften - Meßtechnik, expert verlag (1992)
- [47] Fischer, R.: Elektrische Maschinen, Carl Hanser Verlag (2011)
- [48] Behrends, P.: Elektrische Maschinen, Vogel Business Media (2010)
- [49] Datenblatt der Firma Arnold Magnetic Technologies, Recoma The complete range of SmCo_5 and $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ alloys (2008)
- [50] Poster der Firma Linseis Messgeräte GmbH zu TG-DSC-DTA (2009)

- [51] Schulungsunterlagen der Firma Linseis Messgeräte GmbH zu STA (2012)

12 Anhang

12.1. Anbringung von Lagesensor und Drehgeber im Versuchsstand

Bild 12.1.1 zeigt das Schnittbild des als Lagesensor verwendeten Differentialtransformators (LVDT) und dessen Anbindung im Versuchsstand. Der mechanische Aufbau lässt einen einfachen Austausch des Sensors zu. Die Anbringung des Drehgebers kann Bild 12.1.2 entnommen werden. Beide Sensoren sind in allen drei Achsen einstellbar. Der komplette Versuchsstand ohne Abschirmungen gegen Luftzug ist in Bild 12.1.3 abgebildet.

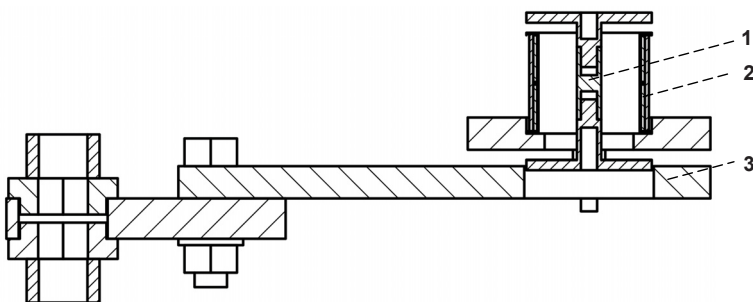


Bild 12.1.1 Schnittbild des eingebauten Lagesensors (Differentialtransformator, LVDT) im Versuchsstand mit entsprechender Halteinrichtung. 1 Ferritkern mit oben und unten angebrachter Wegbegrenzung, 2 Primär- und Sekundärwicklungen des Lagesensors auf einem Spulenkörper; 3 Befestigung des Lagesensors zur genauen Positionierbarkeit in drei Achsen

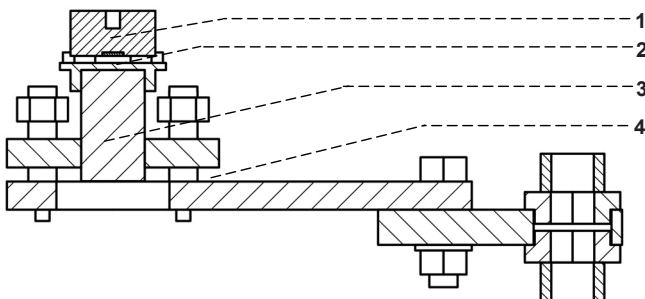


Bild 12.1.2 Schnittbild des im Versuchsstand eingebauten Drehgebers. 1 Magnetscheibe in der Probe; 2 Einstellmaske; 3 Drehgeber; 4 Befestigung zur genauen Positionierbarkeit in drei Achsen

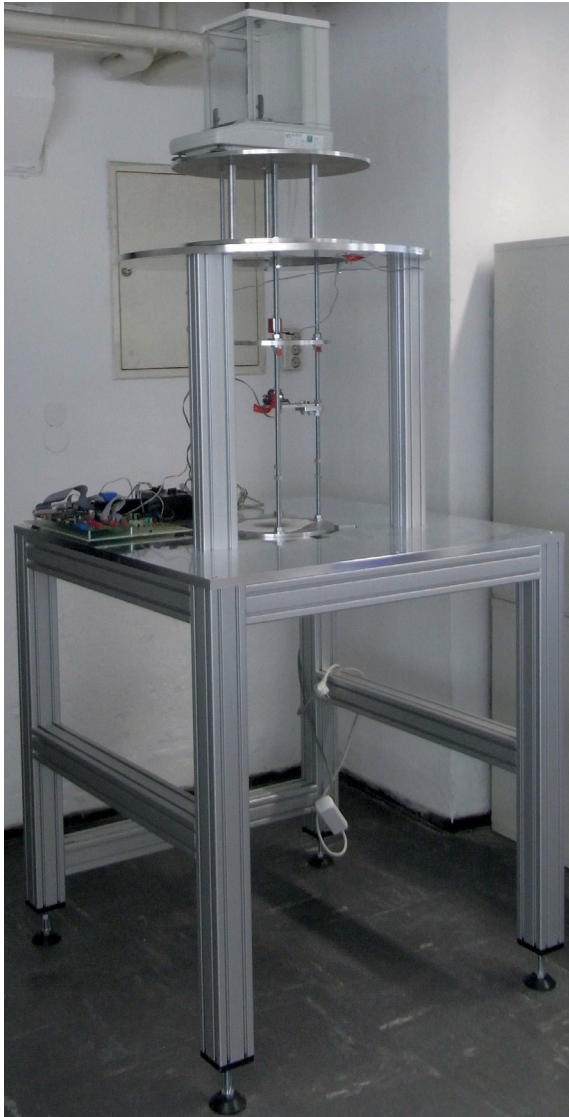


Bild 12.1.3 Gesamter Versuchsaufbau ohne Abschirmungen gegen Luftzug

12.2. Berechnung des Trägheitsmomentes der schwebenden Baugruppe

Die Berechnung des Trägheitsmoments wird für die indirekte Bestimmung der Steilheit der Drehmoment-Kennlinie benötigt (Kapitel 6.6). Bild 12.2.1 zeigt die zu berücksichtigenden Bauteile der Schwebegruppe. Diese besteht aus dem Schwebemagnet mit Gehäuse und Permanentmagnet, Ferritkern des Lagesensors, dem Probegestänge und der Messlast. Diese Skizze lehnt sich dem Stand der Technik an und soll als Berechnungsbeispiel dienen. Je nach Ausführung der zu untersuchenden Lagervariante besitzt die schwebende Baugruppe ein entsprechend anderes Trägheitsmoment, welches in der Berechnung berücksichtigt werden muss.

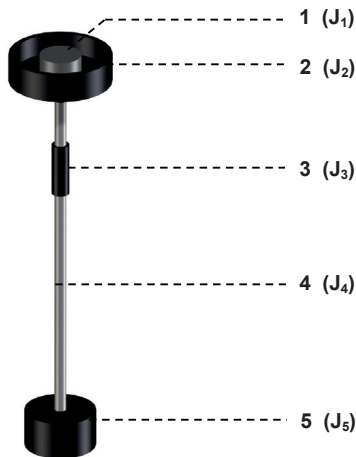


Bild 12.2.1 Skizze der schwebenden Baugruppe bestehend aus 1 Schwebemagnet je nach Bauvariante als Vollzylinder, Quader oder aus sonstiger Form; 2 Ferritkern des Lagesensors; 3 Probegestänge; 4 Messlast mit zugehörigen Trägheitsmoment

Das Gesamtträgheitsmoment berechnet sich demnach zu [41]:

$$J_{\text{ges}} = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 \quad (12.2.1)$$

Die einzelnen Trägheitsmomente lassen sich mit folgenden Gleichungen bestimmen:

Permanentmagnet:
$$J_1 = \frac{1}{2} m_{\text{PM}} \cdot r_{\text{PM}}^2 \quad (12.2.2)$$

$$\text{Gehäuse:} \quad J_2 = m_G \cdot \frac{r_{G,i}^2 + r_{G,a}^2}{2} \quad (12.2.3)$$

$$\text{Ferritkern:} \quad J_3 = \frac{1}{2} m_K \cdot r_K^2 \quad (12.2.4)$$

$$\text{Probengestänge:} \quad J_4 = m_{St} \cdot \frac{r_{St,i}^2 + r_{St,a}^2}{2} \quad (12.2.5)$$

$$\text{Messlast:} \quad J_5 = \frac{1}{2} m_L \cdot r_L^2 \quad (12.2.6)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (12.2.2) bis (12.2.6) in die Gleichung (12.2.1) kann das Trägheitsmoment für die gesamte schwebende Baugruppe berechnet werden.

12.3. Notwendige Materialdaten zur Berechnung der Magnetlager

Bild 12.3.1 zeigt die B-H-Kennlinie des in der Berechnung verwendeten Automatenstahls 11SMn30 (1.0715). Die Daten des permanentmagnetischen Materials Samariumcobalt $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ mit dem Handelsnamen Recoma 28 sind in Tabelle 12.3.1 zu finden [49].

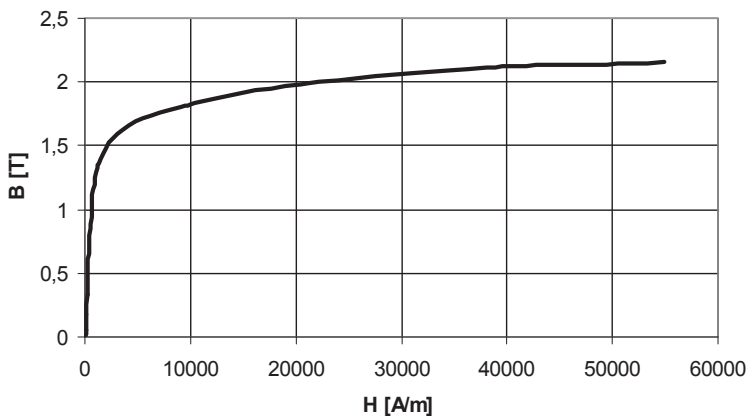


Bild 12.3.1 B-H-Kennlinie des in der Berechnung verwendeten Automatenstahls 11SMn30 (1.0715)

Tabelle 12.3.1 Datenblatt des in der Berechnung verwendeten Permanentmagneten [49]

RECOMA® 28
Magnets based on $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

Magnetic properties at room temperature

| | | | RECOMA 28 | |
|-------------------------------------|---------|--------------------------------|--------------|--------------|
| | | | Typ. | Min. |
| Remanence | Br | (T) (kG) | 1.10 11.0 | 1.04 10.4 |
| Coercive force | HcB | (kA/m) (kOe) | 800 10.0 | 700 8.8 |
| Intrinsic coercive force | HcJ | (kA/m) (kOe) | 2000 25 | 1200 15 |
| Max. specific energy product | (BH)max | (kJ/m ³) (MGoe) | 225 28.0 | 195 24.5 |

The values given in this table may deviate depending on the size and shape of the magnets.

| | | | |
|--|--|-----------------|-------------------|
| Saturation field strength (inner field) | | (kA/m) (kOe) | 4000 50 |
| Rev. temp. coefficient of Br (20 to 150° C) | | %/°C | ca. -0.035 |
| Max. operating temperature | | °C | 350 ¹⁾ |
| Processing method | Pressed in transverse field or isostatically | | |

¹⁾ In the presence of strong demagnetizing fields, or if the magnets operate on a low load line, the max. temperature may be lower.

Characteristic properties at room temperature (indicative values)

| | | |
|--|----------------------|---------------------|
| Density | g/cm ³ | 8.3 |
| Compressive strength | N/mm ² | 800 |
| Flexural strength | N/mm ² | 120 |
| Young's modulus | kN/mm ² | 140 |
| Vickers hardness (HV 5) | | 600 |
| Electric resistivity | 10 ⁻⁶ Ω·m | 0.9 |
| Linear expansion coefficient (20 to 200° C) | 10 ⁻⁶ /K | ll c: 11 ⊥ c: 13 |
| Thermal conductivity | W/(m·K) | 10 |
| Specific heat | J/(kg·K) | 350 |

